

P9-2007-104

Б. Н. Гикал, С. Н. Дмитриев, Г. Г. Гульбежян,
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**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Гикал Б. Н. и др.

P9-2007-104

Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий

На базе циклотрона ДЦ-60 создан ускорительный комплекс для проведения научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Комплекс был спроектирован и построен в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (Дубна) для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан). В результате проведения пусконаладочных работ были получены и ускорены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Kr и других элементов в широком диапазоне масс и энергий. Было проведено облучение различных полимерных пленок, изготовлено несколько контрольных партий трековых мембран в широком диапазоне изменения плотности отверстий. Комплекс является объединяющим фактором в развитии технологий, науки и наукоемкого бизнеса и предназначен для производства трековых фильтров, создания промышленных технологий с использованием нано- и микроструктур на основе ядерных мембран, а также для решения вопросов формирования научной среды и образования в Казахстане.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Gikal B. et al.

P9-2007-104

Cyclotron Based Complex DC-60 for Scientific and Applied Research as well as for Industrial Application in the Nanotechnologies

The newly operating complex based on the cyclotron DC-60 has been built to provide scientific and applied research as well as for industrial application in the nanotechnologies. The facility has been designed and manufactured by the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna) for the International scientific-research center at the Euro-Asia National University named after L. N. Gumilev (Astana, Kazakhstan). High intensity beams of heavy ions of Ne, Ar, Kr and other elements have been accelerated in a wide range of masses and energies. Irradiation of different polymer films has been provided and a few batches of nuclear membranes have been developed in a wide range of hole densities. The complex benefits joint development of technologies, science and related business. The facility is intended for production of Nuclear Filters and is boosting industrial technologies by using of nano- and microstructures based on TM and also assigned to establish scientific environment and education in Kazakhstan.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (Дубна) в сотрудничестве с Институтом ядерной физики (Алма-Ата, Казахстан) был создан специализированный ускорительный комплекс ДЦ-60 для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан) [1]. Основу ускорительного комплекса составляет циклотрон ДЦ-60, способный производить интенсивные пучки тяжелых ионов от лития (Li) до ксенона (Xe) с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. На ускорителе также создан канал пучков ионов низких энергий от 10 до 25 кВ·заряд, получаемых из внешнего источника ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-источник). Проект создания ускорительного комплекса в Астане был реализован в течение 2004–2006 гг.

Научная программа нового центра главным образом направлена на исследования в области физики твердого тела, нанотехнологий, поверхностной модификации материалов. Циклотрон включает в себя три канала для пучков ускоренных ионов. Каждый канал имеет установку для проведения определенного круга исследований, один из них предназначен для специализированного производства трековых мембран (ТМ).

Получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий за последнее время, способным объединить различные дисциплины и отрасли и стать основой ряда нанотехнологий и наукоемкого бизнеса. В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) разработаны методы изготовления трековых мембран на основе различных полимерных материалов, а также технологические процессы их производства в промышленных масштабах. На протяжении 25 лет развивается и совершенствуется технология производства ядерных фильтров с использованием пучков тяжелых ионов на циклотронах национальных ядерных физических центров России, Франции, Германии, США, Японии и других стран. Пучки ионов Ar, Kr, Xe с энергиями 1–1,5 МэВ/нуклон считаются оптимальными для бомбардировки полимерных пленок с целью получения трековых мембран толщиной 10–20 мкм [2].

Общее описание и компоновка циклотрона ДЦ-60. В основу проекта ДЦ-60 легли новые разработки и технологии, полученные в ходе создания и эксплуатации таких циклотронов ЛЯР ОИЯИ, как У-400, У-400М, циклического имплантатора ИЦ-100. Многозарядные ионы получают в ЭЦР-источнике и по каналу инъекции транспортируются в центр магнита циклотрона, где происходит ускорение пучка до финальной энергии. Вывод из циклотрона осуществляется с помощью электростатического дефлектора [3].

Магнитное поле циклотрона имеет четырехсекторную структуру. Высокочастотная ускоряющая система состоит из двух четвертьволновых резонаторов. Изменение частоты ВЧ-системы осуществляется путем перемещения закорачивающих пластин, расположенных внутри резонансных баков. Два дуанта размещены в долинах магнита и соединены друг с другом перемычкой. Питание ВЧ-системы осуществляется от одного генератора с частотой от 11 до 17,4 МГц и мощностью 20 кВт.

Система вывода пучка состоит из электростатического дефлектора и фокусирующего магнитного канала. Энергия ускоренных ионов 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. Трехмерная модель циклотронного комплекса ДЦ-60 представлена на рис. 1, фотография ускорителя — на рис. 2. Система транспортировки ускоренных пучков состоит из специализированного канала для облучения полимерных пленок с целью получения трековых мембран и двух каналов для научных исследований (рис. 1). Циклотронный комплекс имеет также канал для проведения экспериментов на пучках ионов низких энергий (от 10 до 25 кэВ-заряд), получаемых из ионного источника ЭЦР-типа. Основные параметры установки приведены в табл. 1.

Магнит. Электромагнит циклотрона ДЦ-60 имеет Ш-образную форму и состоит из ярма, полюсных сборок, обмоток возбуждения и корректирующих катушек (рис. 3.) Необходимое распределение магнитного поля в рабочем зазоре создается при помощи четырех пар плоских секторов с прямыми границами. Сектора установлены со сдвигом от центра полюса, что позволило создать увеличение азимутальной протяженности секторов от 36° до 50° с ро-

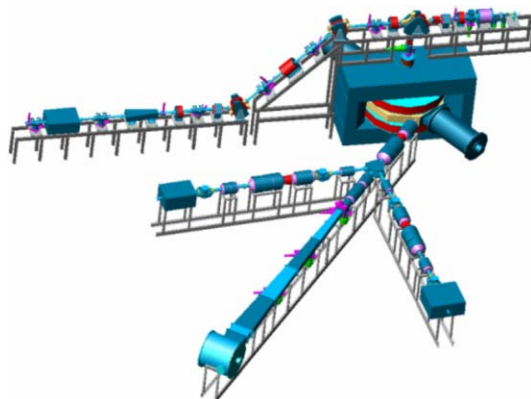


Рис. 1. Трехмерная модель комплекса ДЦ-60. Показаны система транспортировки ускоренных пучков, состоящая из канала для облучения пленки (в центре) и двух каналов для прикладных исследований. Слева — канал пучков ионов низких энергий

Таблица 1. Основные параметры циклотрона ДЦ-60 и отдельных систем

Ускоряемые ионы	От Li до Xe
Отношение массы к заряду ускоряемых ионов	$A/Z = 6-12$
Энергия ионов, МэВ/нуклон	0,35–1,77
Рабочий вакуум в камере циклотрона, торр	$8 \cdot 10^{-8}$
Магнитная система	
Габариты магнита (длина / ширина / высота), мм	4000 / 1700 / 2300
Диаметр полюса, мм	1620
Вес магнита, т	103,5
Среднее магнитное поле, Тл	1,25 – 1,65
Количество секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность)	$36^\circ-50^\circ (0^\circ)$
Зазор между секторами, мм	33
Зазор в долине, мм	176
Зазор между сектором и полюсом, мм	20
Частота радиальных/вертикальных колебаний ν_r / ν_z	1,04 / 0,45
Максимальное число ампер-витков	167 000
Максимальный ток основной обмотки, А	330
Максимальная мощность питания основной обмотки магнита, кВт	45
Радиальные корректирующие катушки	6 пар
— вклад в среднее магнитное поле каждой катушки, Гс	70–100
— максимальный ток в обмотке, А	15
Азимутальные катушки	2 секции по 2 пары
— максимальная амплитуда первой гармоники в секции, Гс	15
Высокочастотная ускоряющая система	
Диапазон перестройки частоты резонаторов, МГц	11–17,4
Номинальная амплитуда напряжения на дуантах, кВ	50
Высокочастотная мощность генератора, кВт	20
ЭЦР-источник	
Частота СВЧ-генератора, ГГц	14,3
Максимальная мощность, подаваемая в ЭЦР-источник, Вт	1000
Катушки ионного источника	2 (по 5 секций)
— число ампер-витков	100 000
— максимальный ток в обмотке, А	1000
— потребляемая электрическая мощность, кВт	70
— магнитное поле на оси (максимум – минимум – максимум), Тл	1,3–0,45–1,1
Гексаполь	
— внутренний диаметр, мм	70
— внешний диаметр, мм	180

Продолжение табл. 1.

ЭЦР-источник	
Гексаполь	
— длина, мм	200
— магнитное поле ($R = 32$ мм), Тл	$\sim 1,1$
Напряжение экстракции, кВ	10–25
Эмиттанс пучка после сепарации в АМ-90, мм·мрад	150π (4 RMS)
Канал аксиальной инжекции пучка	
90-градусный анализирующий магнит (АМ-90)	
— максимальное магнитное поле, кГс	1,4
— радиус магнитной дорожки, мм	500
— межполюсный зазор, мм	100
Максимальное магнитное поле в соленоидах IS1/ IS2 / IS3, кГс	4,4 / 1,9 / 2,1
Акцептанс канала, мм·мрад	160π
Спиральный инфлектор	
2 вида	
Вариант А — для ускорения ионов на 4-й гармонике с $A/Z = 6-8$	
— магнитный радиус, мм	29
— электрический радиус, мм	25
— зазор между электродами, мм	10
— напряжение на электродах, кВ	$\pm 7,5$
Вариант Б — для ускорения ионов на 6-й гармонике с $A/Z = 8-12$	
— магнитный радиус, мм	35
— электрический радиус, мм	25
— зазор между электродами, мм	10
— напряжение на электродах, кВ	± 5
Система вывода	
Электростатический дефлектор	
— азимутальная протяженность	34°
— максимальное напряжение, кВ	60
— зазор между электродом и септумом, мм	10
— толщина септума из молибдена, мм	0,3
Магнитный канал	Пассивный
— азимутальная протяженность	28°
— градиент, кГс/см	3,5–4
— апертура для пучка, мм	25×15
Эмиттанс выведенного пучка, $\varepsilon_R / \varepsilon_Z$, мм·мрад	$15\pi / 18\pi$
Каналы пучков для проведения физических экспериментов	
Канал пучков ионов низкой энергии (10–25 кэВ/заряд)	1 канал
Каналы пучков высокой энергии (0,35–1,77 МэВ/нуклон)	3 канала

стом радиуса и обеспечило формирование изохронной формы распределения магнитного поля по радиусу. В зазоре магнита между секторами и полюсом расположены по шесть пар радиальных корректирующих обмоток для



Рис. 2. Фотография циклотронного комплекса ДЦ-60

коррекции среднего магнитного поля и по две сборки азимутальных гармонических катушек, используемых для коррекции положения орбиты на радиусе вывода.

Магнитное поле циклотрона ДЦ-60 было сформировано на основе комплексного подхода, который состоит из трех основных этапов:

- 1) анализ магнитной структуры для выбора основных характеристик магнитной структуры и согласования с другими системами циклотрона;
- 2) численное моделирование магнитной структуры, в том числе с использованием рабочих чертежей магнита и измеренных магнитных свойств стали, из которой изготавливается магнит;
- 3) измерение магнитного поля, сравнение с расчетами [4].

Применение указанной методики позволило сформировать магнитную структуру, в которой изменение уровня среднего магнитного поля в диапазоне от 1,25 до 1,65 Тл практически не влияет на профиль поля. Распределение магнитного поля по радиусу остается близким к изохронному на всех уровнях возбуждения основной обмотки магнита (рис. 4). Проведенные магнитные измерения показали высокую точность расчетов. В основной области ускорения отклонение измеренного магнитного поля от расчетного не превышает 10 Гс. Коррекции профиля среднего поля при помощи секторных боковых шимм не потребовалось.

Был проведен анализ суммарного вклада первой гармоники магнитного поля, возникающей как вследствие неточностей производства и сборки магнита, так и за счет искажения азимутальной симметрии поля, вызванного установкой магнитного канала. Для компенсации провала среднего поля и ликвидации первой гармоники от данного элемента вывода по бокам сектора,

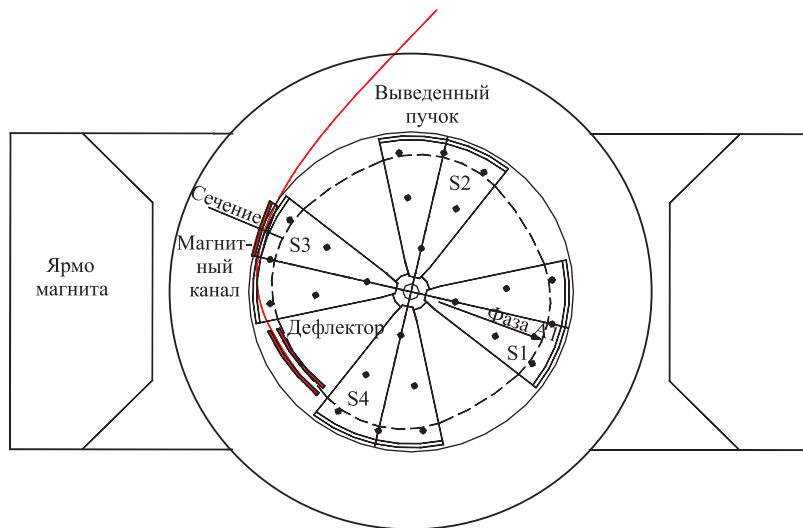


Рис. 3. Магнит ДЦ-60. Вид сверху. Показаны сектора, дефлектор, магнитный канал и выводная траектория

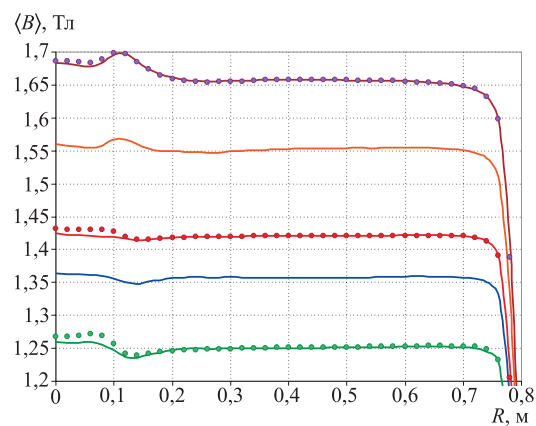


Рис. 4. Среднее магнитное поле ДЦ-60 на пяти уровнях возбуждения основной обмотки магнита. Линии — измерения, кружки — расчеты

в котором расположен канал, были установлены специальные боковые накладки. При расчете профиля боковых шимм были учтены результаты 360° измерений магнитного поля без канала, а также расчет влияния магнитного канала на среднее поле и первую гармонику в зоне ускорения пучка. Суммар-

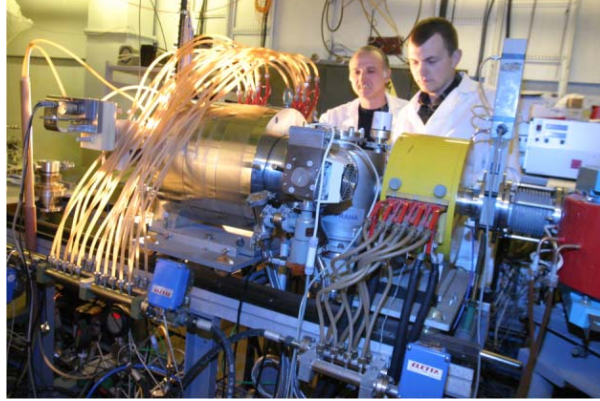


Рис. 5. Фото ЭЦР-источника DECRIС-3

ная амплитуда первой гармоники в основной зоне ускорения не превышает 2–4 Гс и легко компенсируется гармоническими катушками, а значит обеспечивается оптимальная центровка пучка в процессе ускорения.

Хорошее качество формирования магнитного поля в ДЦ-60 было подтверждено впоследствии высокой эффективностью ускорения пучка от центра до радиуса вывода (95 %). В основной зоне ускорения радиальное распределение поля в циклотроне ДЦ-60 близко к изохронному профилю, о чем свидетельствует симметричное расположение резонансных кривых (зависимости тока пучка от уровня поля на различных радиусах) (рис. 13). Незначительные потери пучка в процессе ускорения могут быть вызваны перезарядкой ионов на остаточном газе.

ЭЦР-источник. Циклотрон ДЦ-60 оснащен ЭЦР-источником ионов типа DECRIС-3, который был разработан в ЛЯР ОИЯИ [5, 6]. Общий вид источника показан на рис. 5, а основные параметры приведены в табл. 1. Для формирования требуемого профиля аксиального магнитного поля используются токовые обмотки, а ярмо магнита ЭЦР-источника состоит из «мягких» сортов стали. Радиальная компонента магнитного поля создается гексаполем из постоянных магнитов (материал NdFeB). Конструкция гексаполя была оптимизирована с целью повышения радиальной компоненты поля в районе стенки разрядной камеры до 1 Тл. Ввод СВЧ-мощности, а также подача газообразных и твердых веществ производится по оси разрядной камеры, находящейся под потенциалом 25 кВ. ЭЦР-источник обладает значительным запасом по интенсивности инжектируемых пучков тяжелых ионов и позволяет в широких пределах регулировать ток пучка на мишени.

Система аксиальной инъекции. Канал аксиальной инъекции пучка циклотрона ДЦ-60 предназначен для транспортировки ионов из ЭЦР-источника

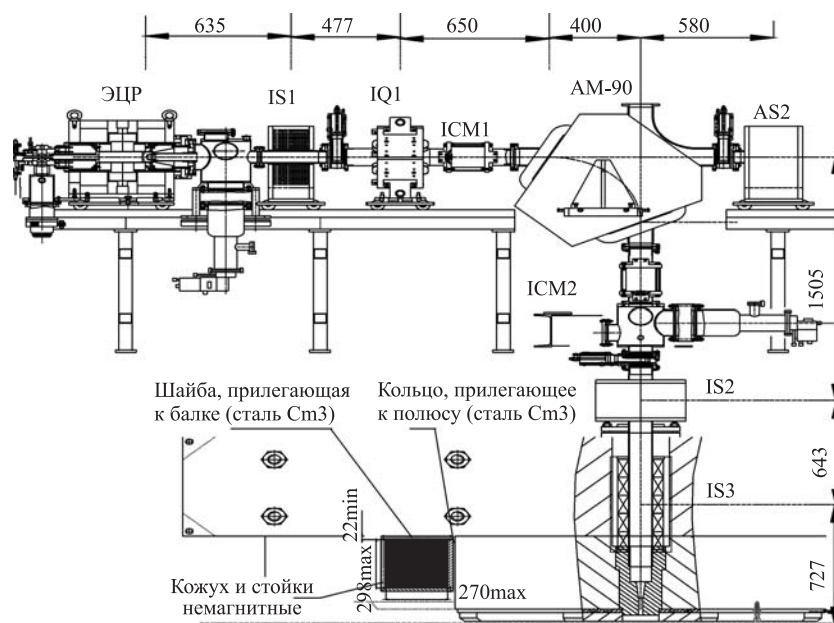


Рис. 6. Схема канала инжекции ДЦ-60: ЭЦР-источник; IS1–3 — фокусирующие соленоиды; IQ1 — квадрупольная линза; AM-90 — анализирующий магнит; ICM1,2 — корректора; AS2 — соленоид канала низкой энергии

в центр циклотрона. Линия позволяет эффективно инжектировать ионы элементов от Li до Xe с отношением массы к заряду от 6 до 12 [7]. Основными ионно-оптическими элементами канала являются фокусирующие соленоиды IS1-IS2-IS3, корректирующая квадрупольная линза IQ1, анализирующий магнит AM-90 и корректирующие дипольные магниты ICM1, ICM2 (рис. 6). Расчет канала был выполнен с помощью библиотеки программ MSIB04 [8]. В расчетах учитывалось собственное поле пучка ионов. Среднеквадратичный эмиттанс (4 RMS) ионов после сепарации в анализирующем магните составляет $\varepsilon \sim 120\text{--}140\pi$ мм·мрад ($\varepsilon_{\text{норм}} \sim 0,25\pi$ мм·мрад), что не превышает пропускную способность канала внешней инжекции ДЦ-60. Акцептанс канала составляет около $A \sim 160\pi$ мм·мрад ($A_{\text{норм}} \sim 0,3\pi$ мм·мрад).

Инжектируемый пучок ионов поворачивается из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона ДЦ-60 с помощью спирального инфлектора. Входное окно инфлектора имеет прямоугольную форму с апертурой 10×20 мм (рис. 7). Для обеспечения оптимальных условий инжекции пучка во всем диапазоне ускоряемых частиц на циклотроне ДЦ-60 используются два варианта инфлектора: с магнитным радиусом $\rho_m = 29$ мм для ускоре-

ния ионов с $A/Z = 6-8$ на 4-й гармонике ВЧ-напряжения и с магнитным радиусом $\rho_m = 35$ мм для ускорения ионов с $A/Z = 8-12$ на 6-й гармонике. Электрический радиус инфлектора равен 25 мм для обоих вариантов. В конструкции инфлектора изоляторы экранированы от прямого попадания пучка и распыленного материала.

Система вывода. Система вывода пучка циклотрона ДЦ-60 предназначена для вывода пучка из зоны ускорения, согласования с оптической системой канала транспортировки и состоит из электростатического дефлектора и фокусирующего пассивного магнитного канала. Электростатический дефлектор располагается в долине циклотрона и имеет азимутальную протяженность 34° (рис. 8). Фокусирующий магнитный канал помещен на краю секторного зазора магнита ДЦ-60 и имеет азимутальную протяженность 28° .

Потенциальная пластина дефлектора покрыта нитридом титана и имеет канавку со стороны пучка глубиной 1 и высотой 20 мм для подавления эмиссии вторичных электронов при попадании пучка на поверхность электрода. Кривизна пластин дефлектора адаптирована для выводных траекторий различных ионов. Для настройки выводных траек-

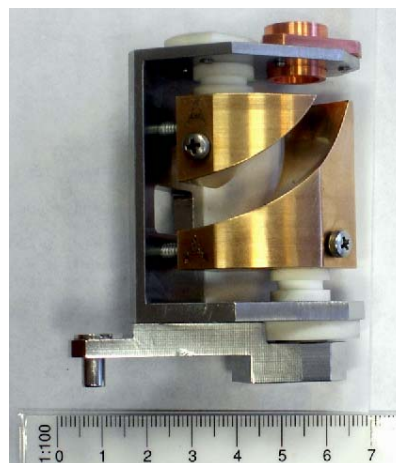


Рис. 7. Спиральный инфлектор (вариант А), магнитный радиус 29 мм

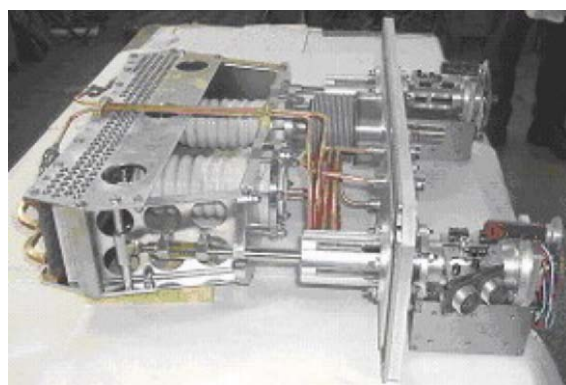


Рис. 8. Внешний вид электростатического дефлектора с механизмом перемещения

торий ионов была изготовлена система перемещения пластин, позволяющая независимо позиционировать вход и выход дефлектора в пределах ± 15 мм от номинального положения. После дефлектора пучок проходит участок спадающего магнитного поля с сильным радиальным градиентом, вызывающим дефокусировку пучка в радиальном направлении. Для компенсации эффекта в ДЦ-60 установлен пассивный фокусирующий магнитный канал сложного профиля, что позволило обеспечить вывод пучков тяжелых ионов за пределы вакуумной камеры циклотрона с эффективностью до 70 %.

Система транспортировки ионных пучков. Система транспортировки ускоренных пучков циклотрона ДЦ-60 состоит из трех каналов, два из которых используются для проведения научно-прикладных исследований, а один — для производства трековых мембран (рис. 9) [9]. В середине выводного магнита ТСМ выбрана точка для согласования всех выводных траекторий пучков ионов с осью канала транспортировки. Угол коррекции пучка в выводном магните составляет $\pm 2,5^\circ$. На начальном участке канала с помощью дублета квадрупольных линз Т1Q1, Т1Q2 формируется промежуточный фокус пучка в центральной точке коммутирующего магнита ТМ, далее пучок транспортируется оптическими элементами каждого канала и формируется на мишени в соответствии с требованием физического эксперимента. Канал №1, на котором расположена установка для облучения полимерной пленки, имеет длину 14 м. В состав канала входят система сканирования пучка, состоящая

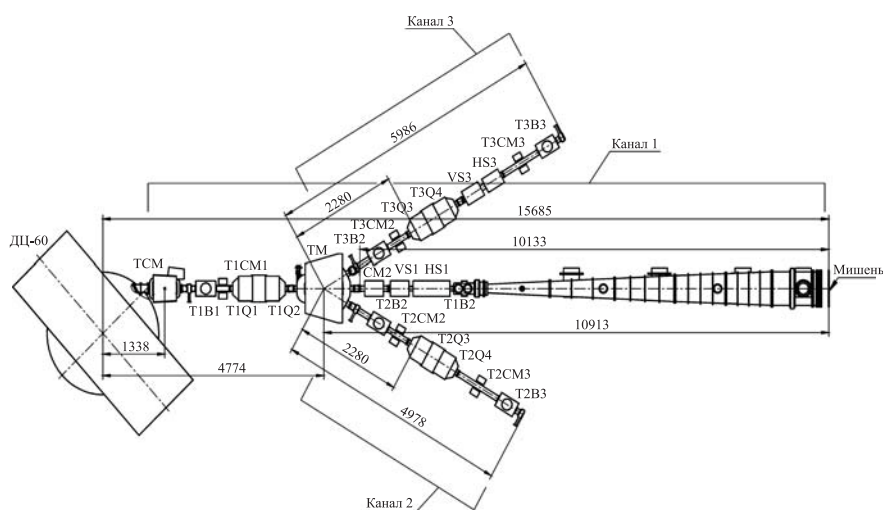


Рис. 9. Схема каналов транспортировки пучков циклотрона ДЦ-60: ТСМ и ТМ — выводной и коммутирующий магниты; Т1В1–Т3В3 — блоки диагностики; Т1СМ1 — Т3СМ3 — корректирующие магниты; Т1Q1–Т3Q4 — квадрупольные линзы; VS1 и VS3 — вертикальные магнитные сканеры; HS1 и HS3 — горизонтальные магнитные сканеры



Рис. 10. Сканирующая система канала № 1

из вертикального VS1 и горизонтального HS1 магнитных сканеров (рис. 10), корректирующие элементы, блоки диагностики пучка.

Вдоль канала № 1 установлена система дифференциальной вакуумной откачки, что позволяет полностью разделить вакуумный объем циклотрона от камеры облучения полимерной пленки. Дифференциальная система откачки состоит из четырех турбонасосов и двух форвакуумных линий. Система сканирования ионного пучка в канале № 1 обеспечивает облучение стационарной мишени размерами 600×220 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$. Для транспортировки ионов в каналы № 2 и № 3 пучок поворачивается коммутирующим магнитом на угол $\pm 30^\circ$. Фокусировка пучка в каждом из каналов осуществляется дублетом линз, а коррекция положения пучка — парой корректирующих магнитов.

Исследование режимов ускоренных пучков. В результате пусконаладочных работ, проведенных на циклотроне ДЦ-60 после его окончательной сборки, были оптимизированы режимы работы ЭЦР-источника, выполнена настройка всех систем ускорителя. Проведена настройка канала для облучения трековых мембран, включая систему сканирования, оптические элементы и механизм перемотки пленки.

На циклотроне ДЦ-60 выполнен ряд экспериментов с пучками заряженных частиц в широком диапазоне изменения A/Z и энергий и получены проектные параметры ускоренных и выведенных пучков ионов.

- Исследованы режимы ускорения ионов азота, аргона, криптона ($^{14}\text{N}^{2+}$, $^{40}\text{Ar}^{4+}$, $^{40}\text{Ar}^{5+}$, $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{84}\text{Kr}^{12+}$) на различных уровнях возбуждения основной обмотки магнита, а также частоты и гармоники ВЧ-ускоряющего напряжения.

- Исследованы возможности группировки пучка с помощью банчера и влияние интенсивности инжектируемого пучка на эффективность ускорения.
- Пучок ускоренных ионов криптона $^{84}\text{Kr}^{12+}$ с током до 2 мкА выведен в ионно-оптический канал, сформирован и проведен до технологической установки по облучению полимерной пленки. Сформировано поле облучения с требуемой плотностью потока частиц и однородностью и проведено экспериментальное облучение полимерной пленки.
- Исследованы режимы оперативной коррекции магнитного поля радиальными катушками циклотрона.

На рис. 11 представлена рабочая диаграмма, которая связывает среднее магнитное поле, энергию ускоренных ионов, частоту обращения ионов и кратность частоты ускоряющего ВЧ-поля. На циклотроне ДЦ-60 ускоряются ионы с отношением массы к заряду $A/Z = 6-12$, энергия ионов выведенного пучка может быть получена от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон, магнитное поле варьируется от 1,25 до 1,65 Тл. Наклонные линии показывают соотношение между полем, частотой обращения ионов и энергией ускоренного пучка. Цифры от 6 до 12, помещенные в квадратные рамки, указывают отношение массы к заряду ускоряемого иона. На диаграмме показаны кривые требуемого роста изохронного среднего магнитного поля от центра до конечного радиуса, который в нашем случае должен составлять от 6 до 26 Гс в зависимости от энергии ускоряемого иона. Рабочая диаграмма разбита на две области, в соответствии с режимами ускорения на 4-й и на 6-й гармониках высокочастотного ускоряющего поля. Точки на рабочей диаграмме, обозначенные кружками с цифрами от 1 до 7, показывают тестовые режимы, в которых проведено исследование процесса ускорения в период пусконаладочных работ.

Параметры пучков ионов, выбранных для ускорения в тестовых режимах, и соответствующие значения основных систем циклотрона представлены в табл. 2. Проводка пучков ионов, указанных в табл. 2, была осуществлена по

Таблица 2. Параметры ионов и систем циклотрона в тестовых режимах 1–7

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	0,58	0,5	1,2	0,65
RF, МГц	12,67	12,67	14,42	14,42	13,2	13,6	15,2
Гармоника	4	4	4	6	6	4	6

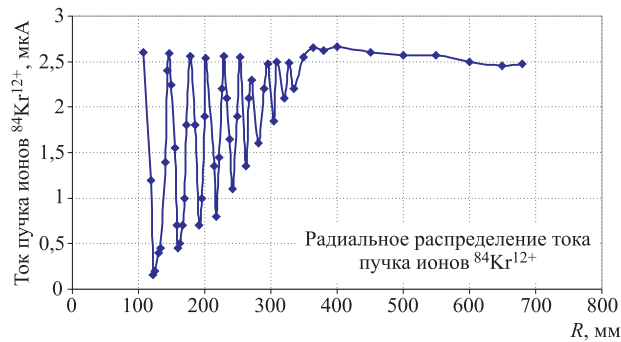


Рис. 12. Радиальная зависимость тока пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Радиальные корректирующие катушки не использовались

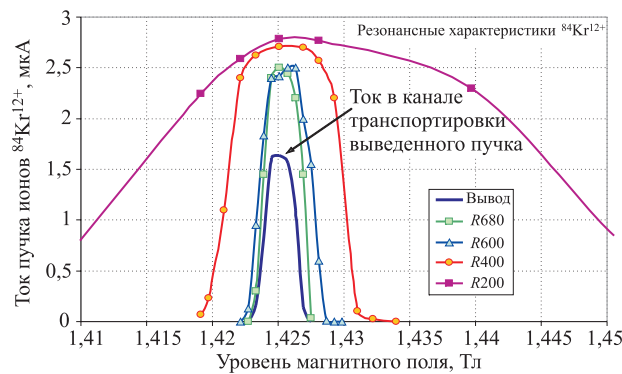


Рис. 13. Резонансные кривые зависимости тока пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$ от уровня поля циклотрона на различных радиусах, а также на цилиндре Фарадея, установленном в начале канала транспортировки выведенного пучка

пучка внутри циклотрона, вызванные перезарядкой ионов на остаточном газе, фазовые потери и апертурные потери составляют не более 5 %, что является вполне допустимым при ускорении тяжелых ионов. На рис. 12 видно, что орбиты на внутренних радиусах разделены, на внешних радиусах разделение орбит не происходит, что соответствует расчетам динамики пучка в процессе ускорения. В ходе экспериментов были сняты резонансные зависимости тока пучка от уровня поля на различных радиусах ускорения внутри циклотрона, включая выведенный пучок (рис. 13). Симметричное положение резонансных кривых и отсутствие каких-либо заметных потерь в процессе ускорения сви-

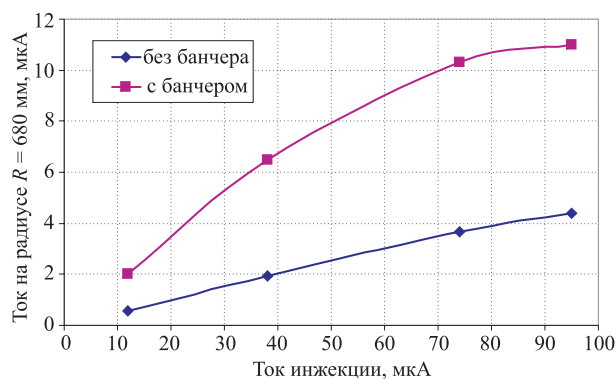


Рис. 14. Зависимость тока ускоренного пучка $^{14}\text{N}^{2+}$ от интенсивности ионов в канале инъекции. Банчер включен/выключен

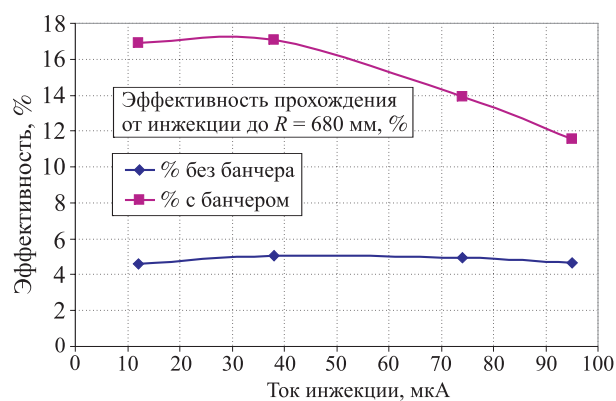


Рис. 15. Зависимость эффективности захвата инжектируемого пучка ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ в ускорение от интенсивности. Банчер включен/выключен

детельствует о высоком качестве формирования магнитного поля циклотрона ДЦ-60.

При вариации магнитного поля от 1,25 до 1,65 Тл для эффективного ускорения пучка в циклотроне используется система корректирующих катушек, позволяющих получить изохронную форму распределения магнитного поля по радиусу в указанном диапазоне. С целью проверки эффективности работы системы корректирующих обмоток были ускорены ионы аргона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на нижнем уровне поля 1,25 Тл, а также ионы $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на верхнем

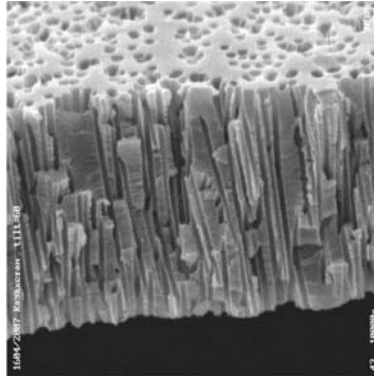


Рис. 16. Фотография трековой мембраны, произведенной на циклотроне ДЦ-60. Диаметр пор 0,4 мкм, плотность $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$

Таблица 3. Эффективность трансмиссии пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$ на различных участках циклотрона ДЦ-60

Ток инж. пучка, мкА	Ток ускор. пучка (банчер вкл.), мкА		Ток выведенного пучка, мкА	Ток пучка на мишени, мкА
	120 мм	680 мм		
11,4	2,7	2,5	1,65	1,65
24 %				
	93 %			
		66 %		
			100 %	
	14,7 %			

уровне поля 1,64 Тл. Во всех случаях коэффициент трансмиссии пучка от центра до конечного радиуса ускорения составил более 90 %.

Была определена зависимость интенсивности ускоренного пучка от амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах, позволяющая оценить эффективность прохождения пучком центральной зоны ускорителя. Показано, что амплитуда напряжения 50 кВ достаточна для эффективного ускорения в центре, что близко к расчетным значениям.

Таблица 4. Перечень ионов, ускоренных на циклотроне ДЦ-60

Ион	A/Z	Энергия иона, МэВ/нуклон	Среднее магнитное поле, Тл	Ток пучка в центре, мкА	Ток пучка на радиусе вывода, мкА
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1	1,42	10,5	10
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,05	1,47	1,86	1,7
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,32	1,64	1,62	1,46
$^{20}\text{Ne}^{3+}$	6,67	1,03	1,4	2,2	2
$^{22}\text{Ne}^{2+}$	11	0,38	1,4	1,85	1,77
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	10	0,65	1,64	1,5	1,4
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,58	1,25	0,98	0,64
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,98	1,63	0,61	0,52
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,67	1,06	1,4	2	1,85
$^{40}\text{Ar}^{7+}$	5,71	1,14	1,25	1,92	1,83
$^{84}\text{Kr}^{12+}$	7	1	1,42	2,72	2,48

Для увеличения эффективности захвата пучка в процесс ускорения в системе аксиальной инжекции установлен синусоидальный банчер на расстоянии 1670 мм от медианной плоскости. Система банчировки увеличивает плотность пучка в области фазового захвата, что ведет к росту интенсивности ускоренного пучка. Вместе с тем увеличение плотности ионов в банче приводит к усилению эффекта пространственного заряда в продольном направлении, что снижает коэффициент банчировки пучка. Экспериментально этот эффект исследован на пучке ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ (рис. 14, 15).

В ходе пусконаладочных работ наиболее тщательно был исследован режим инжекции, ускорения и вывода пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Эффективность прохождения пучком различных участков циклотрона представлена в табл. 3. На пучке ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$ было проведено тестовое облучение полимерной пленки толщиной 12 мкм. После химической обработки пленки были получены трековые мембраны с плотностью отверстий $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Однородность распределения пор как по ширине, так и по длине пленки получена не хуже 5 %, что полностью удовлетворяет условиям промышленного производства трековых мембран (рис. 16).

На циклотроне ДЦ-60 были ускорены также пучки ионов $^{14}\text{N}^{2+}$, $^{20}\text{Ne}^{2,3+}$, $^{40}\text{Ar}^{4,5,6,7+}$, $^{84}\text{Kr}^{12+}$ (см. табл. 4). Полученные интенсивности не являются предельными, так как целью экспериментов была отработка режимов работы

систем ускорителя. В дальнейшем планируется увеличить интенсивность выведенного пучка до 30 мкА для легких ионов, до 5 мкА для ионов криптона и до 3 мкА для ионов ксенона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. В процессе пусконаладочных работ ускорены пучки ионов N, Ar, Kr с энергией от 0,5 до 1,4 МэВ/нуклон. Были исследованы параметры пучков, проведено облучение полимерной пленки, на основе которой изготовлены трековые мембраны.

Представленные в работе результаты являются первыми полученными в ходе пусконаладочных работ. В дальнейшем можно ожидать увеличения интенсивности пучков и расширения диапазона ускоряемых ионов. В заключение авторы хотели бы выразить большую благодарность всем сотрудникам ЛЯР ОИЯИ и ИЯФ, принимавшим участие в создании и запуске ускорительного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гикал Б. Н. и др. Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Отчет. Алма-Ата, 2003. 67 с.
2. Ferain E., Legras R. // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 131. P. 97.
3. Gikal B. et al. Project of the DC-60 Cyclotron with smoothly Ion Energy Variation for Research Center at L.N.Gumilev Euroasia State University in Astana (Kazakhstan) // Proc. XVII Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications. Tokyo, Japan, 2004. P. 205–207.
4. Гикал Б. Н. и др. Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2006-151. Дубна, 2006.
5. Efremov A. et al. Ion source DECRIS-3 // Proc. of the 14th Int. Workshop on ECRIS, CERN. Geneva, Switzerland, 1999. P. 31.
6. Efremov A. et al. // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69, No. 2. P. 679.
7. Гикал Б. Н. и др. Канал аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ Р9-2006-39. Дубна, 2006.
8. Alexandrov V. et al. Space Charge Dominated Beam // Proc. of the Workshop on Physics for Heavy Ion Fusion ECR-Sources, Riken, Japan, 1998. P. 49.
9. Гикал Б. Н. и др. Система транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ Р9-2006-37. Дубна, 2006.

Получено 16 июля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 02.11.2007.

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

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,49. Тираж 300 экз. Заказ № 55943.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/