

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ ПО СИСТЕМЕ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ И ЗАХВАТА ИОНОВ В УСКОРЕНИЕ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ION TRANSPORT IN A SYSTEM OF AXIAL INJECTION AND ION CAPTURE IN ACCELERATION

*П. И. Виноградов, А. А. Протасов, А. А. Лукьянов, И. В. Калагин, В. А. Семин, К. Б. Гикал,
С. Л. Богомолов, Д. К. Пугачев, К. И. Кузьменков, Д. С. Яковлев, И. Г. Пищальников*

*P. I. Vinogradov, A. A. Protasov, A. A. Lukianov, I. V. Kalagin, V. A. Semin, K. B. Gikal,
S. L. Bogomolov, D. K. Pugachev, K. I. Kuzmenkov, D. S. Yakovlev, I. G. Pishchalnikov*

Объединённый институт ядерных исследований, Россия, город Дубна

Joint Institute for Nuclear Research, Russia, Dubna

Ускоритель ДЦ-280 являющийся базовой установкой Фабрики сверхтяжелых элементов, оборудован сильноточным инжектором на базе ЭЦР-источника и высоковольтной платформы. Наличие высоковольтной платформы обеспечивает высокий процент трансмиссии пучка от источника ионов до физической мишени за счет снижения влияния объемного заряда и уменьшения эмиттанса пучка ионов в процессе его инжекции в циклотрон. Расчеты, проводимые для разных режимов работы, показывают, что в ускорение захватываются от 70 до 85 % из ионов, производимых ЭЦР-источником. Проведены исследования транспортировки ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{52}Cr по системе аксиальной инжекции.

Введение

Основываясь на опыте использования внешних инжекционных трактов на ускорителях ЛЯР, при разработке циклотрона ДЦ-280 была предусмотрена высокая энергия инжекции пучка в камеру циклотрона, что приводит к уменьшению эмиттанса пучка и снижению влияния его пространственного заряда [1]. На настоящий момент ускорительный комплекс ДЦ-280 отработал более 20000 часов. За это время было получено множество режимов работы с различными ионами, ускоряемыми в рабочем диапазоне энергий, с пучками разной интенсивности. Удалось достигнуть большую часть проектных значений.

В докладе описаны основные элементы системы инжекции циклотрона ДЦ-280 и представлены экспериментальные исследования транспортировки ионов ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{52}Cr , которые были получены, основываясь на большом количестве данных. Подробно разобрано влияние полигармонического банчера на захват ионов в ускорение.

А также рассмотрены результаты эффективности захвата в ускорение пучка ионов от энергии его инжекции в камеру циклотрона.

Основные элементы системы аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-280

Все оборудование системы аксиальной инжекции расположено на специальной платформе над ярмом магнита циклотрона ДЦ-280. Основная цель аксиальной инжекции заключается в получении различных многозарядных ионов и их транспортировки в камеру циклотрона [2].

Циклотрон ДЦ-280 разработан для ускорения пучков высокой интенсивности (выше 10 мкА частиц для ионов средних масс) [3]. Система аксиальной инжекции также была оптимизирована для работы с высокоинтенсивными пучками. Для уменьшения влияния расталкивания заряженных частиц в процессе их транспортировки и инжекции в циклотрон была повышена их энергия. Для этого часть оборудования системы аксиальной

инжекции была размещена на высоковольтной платформе.

Высоковольтная платформа представляет собой изолированную от земли конструкцию из металлических труб, которая расположена на 6-ти опорных изоляторах. Основными элементами аксиальной инжекции, которые расположены на высоковольтной платформе, являются: источник ионов DECRIС-PM, анализирующий магнит и ускоряющая трубка. Кроме основных элементов часть инжекционного тракта, расположенная на высоковольтной платформе, имеет: систему ионной оптики, систему вакуумной откачки, систему питания и управления элементами, систему диагностики пучка ионов и систему питания СВЧ мощностью ЭЦР-источника (рис. 1).

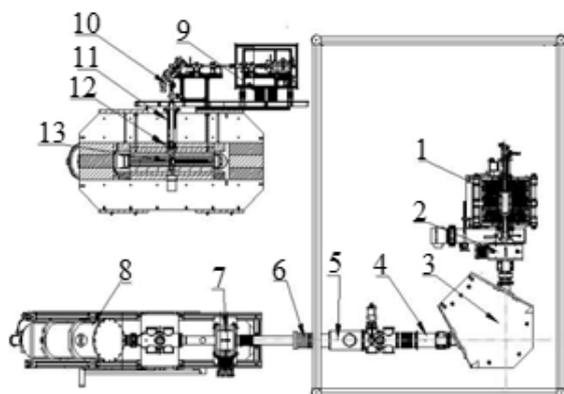


Рис. 1. Общий вид системы аксиальной инжекции. 1 – ЭЦР-источник DECRIС-PM; 2, 7, 11, 12 – соленоиды; 3 – анализирующий магнит, 4 – чоппер; 5 – электростатическая линза; 6 – ускоряющая трубка; 8 – электростатический дефлектор (бендер); 9 – водяной дроссель; 10 – полигармонический группирователь (банчер); 13 – инфлектор

Для обеспечения циклотрона интенсивными пучками ионов используется ЭЦР-источник DECRIС-PM на постоянных магнитах [4]. В магнитной структуре предусмотрена одна вспомогательная обмотка для корректировки минимума магнитного поля. Схема источника показана на рис. 2. Данный источник работает на частоте 14 ГГц, и позволяет эффективно получать ионы низких и средних зарядов.

Вакуумный объем источника соединяется с ионопроводом через изолятор. Это позволяет создать разницу потенциалов между источником и специальным вытягивающим электродом. Максимальное рабочее напряжение ЭЦР-источника составляет 30 кВ.

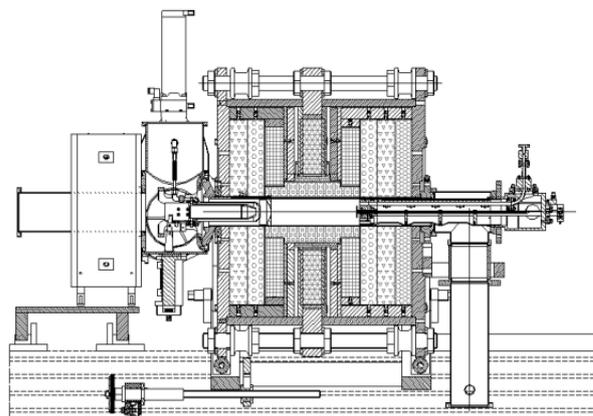


Рис. 2. Схема ЭЦР-источника DECRIС-PM

Для сепарации ионного пучка, полученного из ЭЦР-источника, по отношению массы к заряду (A/Z) используется анализирующий магнит, который находится на высоковольтной платформе [5]. Общий вид анализирующего магнита IM90 показан на рис. 3.

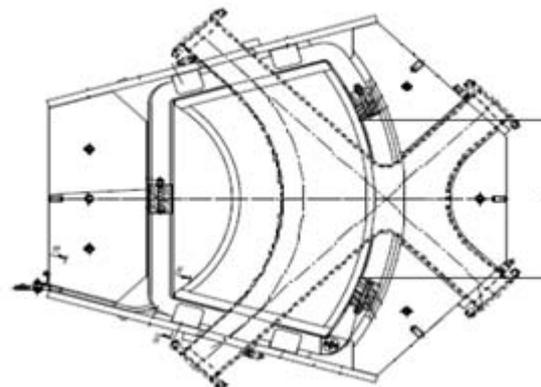


Рис. 3. Общий вид анализирующего магнита IM90

После высоковольтной платформы по ионопроводу поток частиц попадает в ускоряющую трубку, которая предназначена для передачи энергии ионам до $70 \text{ кэВ} \cdot Z$. Для фокусировки ионов на вход соленоида используется электростатическая линза, установленная после анализирующего магнита. Ускоряющая трубка представляет собой набор последовательно чередующихся керамическими изоляторов и электродов, которые соединены через сопротивления (10 шт. по 150 МОм) для выравнивания потенциалов. Схема ускоряющей трубки изображена на рис. 4.



Рис. 4. Схема ускоряющей трубки

После прохождения горизонтальной части аксиально инжекции ионы переводятся в вертикальный участок с помощью сферического электростатического дефлектора (бендера) (рис. 5). Электроды бендера имеют независимое друг от друга питание, на верхний электрод подается положительное напряжение, а на нижний отрицательное. Максимальное рабочее напряжение на электродах ± 20 кВ.

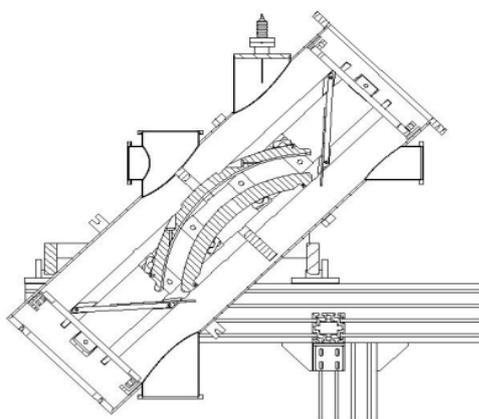


Рис. 5. Вид электростатического дефлектора в разрезе

Для преобразования непрерывно движущихся ионов в сгустки (банчи), используется полигармонический банчер, который установлен в вертикальной части аксиальной инжекции непосредственно после электростатического бендера по направлению движения ионов. Группировка позволяет увеличить количество ионов, захваченных в режим ускорения.

Конструкция банчера представляет собой трубку дрейфа, на которую подается напряжение с частотой ускоряющего поля, и две сетки, на которые подается 2-я и 3-я гармоника ускоряющего поля. На входе и выходе в банчер установлены пластины с потенциалом земли. На всех пластинах и трубке дрейфа установлены сетки из вольфрама

толщиной 0,1 мм. Общий вид банчера представлен на рис. 6.

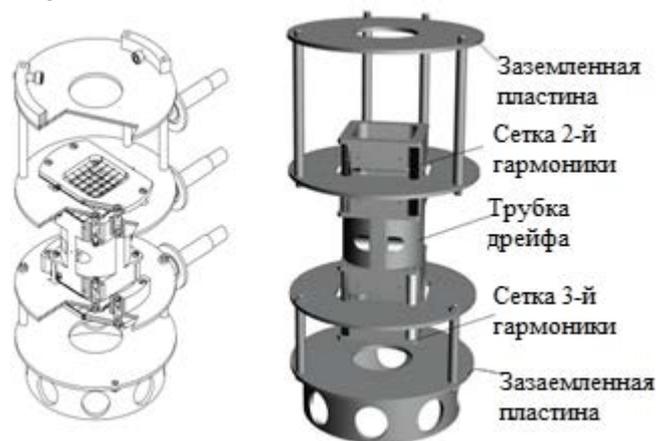


Рис. 6. Общий вид полигармонического банчера

При сложении трех гармоник формируется пилообразное напряжение с частотой ускоряющего поля. Данное напряжение действует на непрерывный поток ионов, которые группируются на всем промежутке дрейфа от банчера до пуллера (первый ускоряющий зазор) [6].

Для перевода пучка ионов из аксиальной инжекции в медианную плоскость циклотрона и дальнейшего его заброса в ускорение используется спиральный инфлектор, состоящий из двух жестко закрепленных между собой спиральных электродов. Питание электродов независимое, а максимальный потенциал на электродах достигает ± 20 кВ.

После спирального инфлектора поток ионов попадает в область действия электростатической квадрупольной линзы, которая предназначена для коррекции вертикального размера пучка на выходе инфлектора. Устройство состоит из четырех электродов, закрепленных жестко относительно друг друга на изоляторе. Изолятор линзы прикреплен к спиральному инфлектору таким образом, что ось выхода из инфлектора совпадает с осью электростатической линзы. Максимальный потенциал на электродах составляет ± 6 кВ.

Экспериментальные данные

В ходе работы ускорителя с момента запуска, было получено огромное количество данных, позволяющих оценить режимы работы системы аксиальной инжекции и захвата в ускорение пучков с разной степенью ионизации. Основными частицами для ускорения послужили ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{48}Ti , ^{52}Cr и ^{54}Cr . В процессе настройки ускорителя проводи-

лось сравнение захвата в ускорения пучков с разной степенью ионизации (от +8 до +10). Дополнительно отслеживались такие параметры как: влияние повышения напряжения на ЭЦР-источнике при сохранении энергии инжекции в циклотрон; работа системы фазовой группировки пучка (полгармонического банчера); проверка элементов аксиальной инжекции при долгосрочной программе эксперимента.

Режимы работы аксиальной инжекции и захвата в ускорении для пучков с разной степенью ионизации

Для определения процента трансмиссии пучка по аксиальной инжекции отслеживались показания установленных на ней цилиндров Фарадея. Так для ионов ^{48}Ti и ^{48}Ca были получены данные, которые позволили оценить влияние степени ионизации частицы на процент трансмиссии и захвата пучка в ускорение (табл. 1).

Исследования, проведенные для ионов ^{48}Ca и ^{48}Ti , показывают, что система аксиальной инжекции используемой конструкции высокоэффективна на всем рабочем диапазоне для всех ионов с подходящим отношением заряда к массе. Также высокая эффективность работы канала аксиальной инжекции была подтверждена при работе с иона-

ми ^{40}Ar и ^{52}Cr . Гибкость настроек позволяет выбирать оптимальный режим в зависимости от требуемой энергии инжекции.

Влияние повышения напряжения на ЭЦР-источнике при сохранении энергии инжекции

Для определения оптимальной настройки системы аксиальной инжекции проводилось исследование влияния повышения потенциала ЭЦР-источника при сохранении суммарного потенциала ЭЦР-источника и высоковольтной платформы (сохранение энергии инжекции) на эффективность прохождения пучков ионов $^{48}\text{Ti}^{9+}$ по каналу аксиальной инжекции и их захвата в ускорение.

Интенсивности пучков для различных режимов представлены в табл. 2. Измерения для потенциалов 16–18 кВ проводились в рамках одной серии, так же они сравнивались с отлаженным рабочим режимом при 15 кВ. Как видно из прохождения по каналу инжекции и захвату в ускорение в рамках одной серии наилучшим процентом трансмиссии обладает режим 16 кВ. При сравнении режимов работы с напряжением ЭЦР-источника 16кВ и 15кВ видно, что данные режимы практически равны.

Таблица 1

Интенсивности и эффективности для различных зарядностей ^{48}Ti и ^{48}Ca

Степень ионизации	Аксиальная инжекция			Циклотрон	Эффективность		
	Ток из ЭЦР-источника $I_{\text{ЭЦР}}$, (рμА)	Ток после ускоряющей трубки, (рμА)	Ток перед инжекцией в циклотрон $I_{\text{инж.}}$, (рμА)	Ток в циклотроне на радиусе 400 мм $I_{\text{зах.}}$, (рμА)	По аксиальной инжекции $E_{\text{инж.}}$	Захват в ускорение $E_{\text{зах.}}$	$E_{\text{ЭЦР-зах.}}$
^{48}Ca							
8+	4,43	4,34	4,00	2,75	90,9 %	68,8 %	62,1 %
9+	3,94	3,81	3,51	2,44	89,1 %	69,5 %	61,9 %
10+	3,96	3,84	3,71	2,71	93,7 %	73,1 %	68,4 %
^{48}Ti							
8+	2,25	1,95	1,58	1,14	70,2 %	72,2 %	50,7 %
9+	2,88	2,73	2,46	1,75	85,5 %	71,1 %	60,7 %
10+	2,23	20,52	1,91	1,31	85,7 %	68,6 %	58,7 %

Таблица 2

Интенсивности пучков ионов $^{48}\text{Tl}^{9+}$ для различных потенциалов ЭЦР-источника

Напряже- ние на ЭЦР-источнике	Аксиальная инжекция			Циклотрон	Эффективность		
	Ток из ЭЦР- источника $I_{\text{ЭЦР}}$, (рμА)	Ток после ускоряющей трубки, (рμА)	Ток перед инжекцией в циклотрон $I_{\text{инж.}}$, (рμА)	Ток в циклотроне на радиусе 400 мм $I_{\text{зах.}}$, (рμА)	По аксиаль- ной инжек- ции $E_{\text{инж.}}$	Захват в ускорение $E_{\text{зах.}}$	$E_{\text{ЭЦР-зах}}$
15 кВ	3,02	2,53	2,18	1,54	72,2 %	70,6 %	51 %
16 кВ	2,5	2,18	1,85	1,29	74 %	69,7 %	51,6 %
17 кВ	2,68	2,35	1,94	1,33	72,5 %	68,6 %	49,6 %
18 кВ	2,71	2,39	1,90	1,32	70,1 %	69,5 %	48,7 %

Таблица 3

Влияние работы банчера на эффективности разных этапов ускорения

Режим работы	Интенсивность (рμА)					Эффективность, (%)				
	$I_{\text{ЭЦР}}$	$I_{\text{инж.}}$	$I_{\text{захв.}}$	$I_{\text{вых.}}$	$I_{\text{к. т.}}$	$E_{\text{инж.}}$	$E_{\text{зах.}}$	$E_{\text{цикл.}}$	$E_{\text{вых.}}$	$E_{\text{ЭЦР-зах.}}$
Без банчера	3,65	3,27	0,45	0,30	0,21	89,8	13,69	53,87	68,98	5,88
С банчером	3,56	3,20	2,19	1,97	1,71	89,69	68,48	86,92	86,94	48,19

Из таблицы 2 видно, что вариация потенциала ЭЦР-источника не оказывает существенного влияния на эффективность работы системы аксиальной инжекции. Наибольшее влияние вносит точность подбора параметров оптических элементов, выполняемая операторами ускорительного комплекса. Это дополнительно было проверено при работах с пучками высокой интенсивности ионов $^{48}\text{Ca}^{10+}$. Кроме того, поднятие напряжения на ЭЦР-источнике до уровня 18 кВ приводит к регулярным высоковольтным пробоям и высокому току утечки на вытягивающем электроде, что отражается на стабильности пучка и приводит к повреждению оборудования. Можно сделать вывод об оптимальности напряжения на ЭЦР-источнике 15 кВ.

Влияние повышения напряжения на ЭЦР-источнике при сохранении энергии инжекции в циклотрон было изучено и на таких частицах как ^{40}Ar и ^{52}Cr . Все исследования определили оптимальное напряжение на ЭЦР-источнике 15 кВ.

Работа системы фазовой группировки пучка – полигармонического банчера

Для фазовой группировки непрерывного пучка в область фазового захвата циклотрона используется полигармонический банчер, описанный ранее. Для оценки его эффективности проводились измерения интенсивностей пучков на разных эта-

пах ускорения $^{48}\text{Ca}^{10+}$. Настройки ускорителя оптимизировались для работы с банчером и без банчера. Сравнение интенсивностей и эффективностей на разных этапах ускорения представлены в табл. 3.

Включение в работу банчера положительно влияет не только на захват в ускорение, но также и на прохождение внутри циклотрона и его вывод в канал транспортировки. Полное включение банчера увеличивает интенсивность на выводе из циклотрона в 8,2 раза.

Данная работа проводилась и на других ускоряемых частицах:

- Для $^{48}\text{Tl}^{9+}$ включение банчера позволяет увеличить интенсивность на выходе из циклотрона в 7,55 раза;
- Для $^{52}\text{Cr}^{9+}$ включение банчера позволяет увеличить интенсивность на выходе из циклотрона в 7,08 раза;
- Для $^{40}\text{Ar}^{8+}$ включение банчера позволяет увеличить интенсивность на выходе из циклотрона в 7,26 раза;

Зависимость захвата в ускорение от энергии инжекции

В ходе данной работы были проведены исследования зависимости захвата в ускорение от энергии инжекции пучка ионов в камеру циклотрона. Были проанализированы все данные прохождения

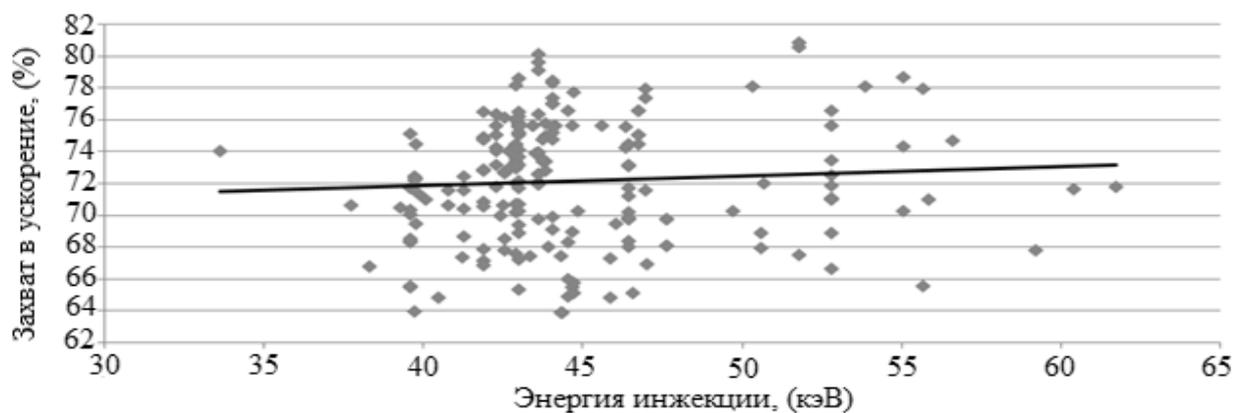


Рис. 7. Зависимость захвата ионов в ускорение от энергии инжекции

ионов от ЭЦР-источника до радиуса захвата пучка в ускорение. В ходе анализа были исключены результаты работы ускорителя без банчера. По полученным точкам была построена линия среднего значения. График зависимости можно наблюдать на рис. 7.

Из графика видно незначительное улучшение захвата в ускорение с увеличением энергии инжекции. Это обуславливается тем, что банчер увеличивает процент захвата ионов в ускорение более чем в 5 раз во всем рабочем диапазоне.

Работа элементов аксиальной инжекции при долгосрочной программе эксперимента

На сегодняшний день ускоритель ДЦ-280 отработал более 20000 часов. Ускорительный комплекс проектировался для проведения экспериментов с длительной экспозицией. При таком режиме работы важна не только высокая эффективность, но и безаварийный режим работы.

За время работы были исправлены проблемы конструкции, выявленные в процессе эксплуатации: были доработаны электроды инфлектора для исключения высоковольтных пробоев; был оптимизирован размер входной диафрагмы инфлектора; разработаны алгоритмы автоматических измерений.

При переходе на работу с пучками высокой интенсивности выявилась проблема с разрушением сеток банчера. Под действием пучка происходит разрушение проволок сеток банчера, что иногда приводит к замыканию на землю. После замыкания сетка перестает быть работоспособной, что приводит к остановке ускорителя и ремонту банчера. Периодичность возникновения проблемы 1 раз в месяц при работе с пучками интенсивностью порядка 5 μA и выше. При работе с интен-

сивностью на уровне 1 μA периодичность выхода из строя банчера 1 раз в 3 месяца.

Ремонт банчера занимает не более одной рабочей смены (8 часов) и в целом периодичность 1 раз в месяц, не является критичной. В дальнейшем планируется оптимизация конструкции банчера. Для сокращения времени ремонта был изготовлен аналогичный банчер.

На других элементах критических проблем не выявлено. Ускоритель работает в режиме планового сервисного обслуживания 2 раза в год, во время которого проводится полное сервисное обслуживание узлов, обеспечивающие их безаварийную работу.

Заключение

За все время работы циклотрона ДЦ-280, система аксиальной инжекции циклотрона была опробована в разных режимах работы, в ходе чего была набрана база данных настроек ускорителя с высокой эффективностью ускорения. Данная база позволила провести ряд исследовательских работ, которые определяют оптимальные условия настройки системы.

Полученные данные в ходе исследования режимов работы аксиальной инжекции и захвата в ускорении для пучков с разной степенью ионизации говорят о высокой эффективности конструкции на всем рабочем диапазоне для всех ионов с подходящим отношением заряда к массе.

Рассмотренная работа системы фазовой группировки пучка показывает, что использование банчера аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-280 позволяет увеличить захват в ускорение более чем в 5 раз. К тому же общий процент трансмиссии пучка увеличивается более чем в 7 раз при включении системы фазовой группировки.

К тому же, основываясь на данных, полученных в ходе работы ускорителя за 5 лет, была построена зависимость захвата ионов в ускорение от энергии инжекции, которая показывает увеличение процента захвата пучка в ускорение с повышением энергии инжекции пучка в камеру циклотрона. Также была рассмотрена работа элементов аксиальной инжекции при долгосрочной программе эксперимента.

Полученные результаты будут полезны при проектировании новых и модернизации существующих систем инжекции. Данная конструкция и компоновка системы аксиальной инжекции будет использована для создания сильноточного инжектора многозарядных ионов на базе сверхпроводящего ионного ЭЦР-источника для циклотрона ДЦ-280.

Список литературы

1. Гульбемян Г. Г., Гикал Б. Н., Бехтерев В. В. и др. Проект системы аксиальной инжекции для циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6 (190). С. 1181–1196.
2. Гульбемян Г. Г., Дмитриев С. Н., Иткис М. Г. и др. Запуск циклотрона ДЦ-280 – базовой установки Фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 6 (225). С. 653–665.
3. Виноградов П. И., Протасов А. А., Семин В. А. и др. Влияние «FLAT-TOP» резонансной системы ускорителя ДЦ-280 на пучок заряженных частиц // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2023. № 1. 2310502. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310502.
4. Gikal K. B.[†], Bogomolov S. L., Ivanenko I. A. and etc. Peculiarities of producing 48Ca, 48Ti, 52Cr beams at the DC-280 // RuPAC2021, Alushta, Russia, DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA01.
5. Semin V. A.[†], Bogomolov S. L., Gikal K. B. and etc. The experimental research of cyclotron DC-280 beam parameter // RuPAC2021, Alushta, Russia DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA04.
6. Гульбемян Г. Г., Зарубин В. Б., Карамышева Г. А. и др. Высокочастотная ускоряющая система циклотрона ДЦ-280. // Письма в ЭЧАЯ. А. 2012. Т. 9, № 8. С. 89–97.