

ЗАПУСК ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280 — БАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ФАБРИКИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЯР ОИЯИ

*Г. Г. Гульбежян, С. Н. Дмитриев, М. Г. Иткис, Ю. Ц. Оганесян,
Б. Н. Гикал, И. В. Калагин¹, В. А. Семин, С. Л. Богомолов, В. А. Бузмаков,
И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов, Н. Ф. Осипов, С. В. Пащенко,
В. А. Соколов, Н. Н. Пчелкин, С. В. Прохоров, М. В. Хабаров, К. Б. Гикал*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Завершено создание циклотрона ДЦ-280 — базовой установки фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ) Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В основу проекта ДЦ-280 легли как новые, так и экспериментально проверенные научные и инженерные решения ЛЯР ОИЯИ. Планируемые интенсивности пучков ионов средних масс ($A \sim 50$) до 10 мкА частиц на порядок превосходят достигнутые на сегодня на циклотроне У-400. В период с 2016 по 2018 г. выполнены монтаж и наладка оборудования циклотрона ДЦ-280. Первый пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ был ускорен в ДЦ-280 26 декабря 2018 г. и выведен из ускорителя в канал транспортировки ускоренных ионов 17 января 2019 г. В марте 2019 г. пучки ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с интенсивностью 1,36 мкА частиц и ионов $^{12}\text{C}^{2+}$ с интенсивностью 10 мкА частиц были ускорены и выведены в канал транспортировки с энергией $\sim 5,8$ МэВ/нуклон. Основная задача нового ускорителя — выполнение долгосрочной программы исследований фабрики СТЭ, нацеленной на синтез новых ($Z \geq 119$) и детальное изучение ядерно-физических и химических свойств открытых ранее элементов 112–118.

Creation of DC-280 cyclotron, the basic facility of the Factory of Superheavy Elements (SHE), is complete. The project is based on both new and experimentally tested engineering decisions of the JINR FLNR. Planned beam intensities up to $10 p \cdot \mu\text{A}$ for ions with average masses ($A \sim 50$) are one order higher than those reached so far at the U-400 cyclotron. From 2016 to 2018 installation and adjusting of the DC-280 cyclotron equipment have been done. The first beam of $^{84}\text{Kr}^{14+}$ ions was accelerated in the DC-280 on December 26, 2018 and extracted to the ion transport channel on January 17, 2019. In March 2019, beams of accelerated $^{84}\text{Kr}^{14+}$ ions with an intensity of $1.36 p \cdot \mu\text{A}$ and $^{12}\text{C}^{+2}$ ions with an intensity of $10 p \cdot \mu\text{A}$ were extracted from the DC-280 to the beam transport channel with energy about 5.8 MeV/nucleon. The main task of the new accelerator is implementation of the long-term program of researches on the SHE Factory aimed at synthesis of new elements ($Z \geq 119$) and detailed studying of nuclear-physical and chemical properties of earlier opened 112–118 ones.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Открытие новых сверхтяжелых элементов с $Z = 114$ –118 явилось одним из наиболее ярких научных результатов последнего десятилетия. Приоритетные эксперименты

¹E-mail: kalagin@jinr.ru

были выполнены на ускорительном комплексе У-400 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Синтез осуществлен в реакциях полного слияния дважды магического ядра ^{48}Ca с нейтронно-избыточными ядрами актиноидов ($^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , ^{249}Cm , ^{249}Bk , ^{249}Cf).

Открытие новой области (острова) стабильности и сам факт существования сверхтяжелых элементов поставили целый ряд новых вопросов, связанных с фундаментальными свойствами ядерной материи. Могут ли существовать еще более тяжелые ядра? Является ли «Остров стабильности СТЭ» последним на карте нуклидов? Могут ли сверхтяжелые ядра образоваться в процессах нуклеосинтеза подобно тому, как образовались в природе стабильные и долгоживущие ядра группы Pt, Pb и U–Th? Где границы Периодической таблицы Д. И. Менделеева? Насколько химические свойства сверхтяжелых элементов подобны их легким гомологам?

Прямой синтез элементов с $Z \sim 118$ в реакциях слияния связан с переходом к бомбардирующим ядрам тяжелее Ca, так как возможности наработки на ядерных реакторах мишенного материала ограничены производством изотопов Cf. Ожидается, что сечения образования ядер с $Z = 120$ в реакции $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr}$ и ядер с $Z = 119$ в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti}$ будут примерно в 10–20 раз ниже сечения образования изотопов СТЭ в экспериментах с ^{48}Ca . Для более детального изучения ядерно-физических и химических свойств СТЭ также необходимо существенно повысить эффективность экспериментов.

Решению данной задачи и посвящен реализуемый в ЛЯР ОИЯИ проект создания первой в мире фабрики сверхтяжелых элементов [1]. Она создается с перспективой на 20–25 лет (как и все ускорители тяжелых ионов ОИЯИ) и должна быть востребованной в качестве экспериментального комплекса, обеспечивающего лидирующие позиции в науке тяжелых и сверхтяжелых элементов.

Базовой установкой фабрики СТЭ является новый ускоритель тяжелых ионов — циклотрон ДЦ-280 с интенсивностью пучков более 10 мкА частиц для ионов средних масс ($A \sim 50$), что на порядок превышает достигнутое.

В основу проекта ДЦ-280 легли как новые, так и экспериментально проверенные научные и инженерные решения ЛЯР ОИЯИ, найденные в ходе создания, эксплуатации и усовершенствования циклотронов У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-72, ДЦ-60 и ДЦ-110.

1. ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ

Проектные параметры циклотрона ДЦ-280 приведены в табл. 1. Для проведения исследований в области синтеза сверхтяжелых элементов и изучения их свойств требуется диапазон энергий ионов от 4 до 8 МэВ/нуклон. Интенсивности ускоренных пучков ионов с атомной массой $A \sim 50$ должны быть более 10 мкА частиц. Из ЭЦР-источника необходимо получать интенсивности более 20 мкА частиц для ионов с $A \sim 50$.

С этой целью разработан циклотрон ДЦ-280 с проектными параметрами пучка, представленными в табл. 1.

Решающим фактором при выполнении проекта было достижение высокого коэффициента трансмиссии пучка на всех этапах от ионного источника до мишени. Для достижения этой цели разработана система высоковольтной инжекции пучка, снижающая влияние пространственного заряда пучка ионов в канале инжекции. Расчетная мощность пучка на выводном радиусе составляет более 2 кВт. Особое внимание в проекте уделено

Таблица 1. Проектные параметры пучков циклотрона ДЦ-280

Параметр	Значение
Энергии ускоренных ионов, МэВ/нуклон	4–8
Атомные массы ускоренных ионов A	10–238
Интенсивности для ионов с $A \sim 50$, мкА частиц	Не менее 10
Эмиттанс выведенного пучка, π мм · мрад	Менее 30
Коэффициент трансмиссии пучка ионов от высоковольтной платформы инжектора до экспериментальной установки, включающий в себя эффективность инжекции, ускорения, вывода пучка и транспортировки до мишени, %	> 50

Таблица 2. Принципы разработки и ожидаемые результаты

Принцип разработки	Ожидаемый результат
Высокий потенциал инжекции пучка (до 80 кВ)	Снижение влияния пространственного заряда пучка в канале инжекции. Высокий коэффициент захвата пучка в ускорение
Высокий темп ускорения ионов (до 130 кВ на дуантах, 480 кВ на оборот на 3-й гармонике) Низкий уровень магнитного поля (до 1,3 Тл)	Уменьшение потерь пучка в процессе ускорения. Хорошее разделение орбит на радиусе вывода, эффективный вывод пучка при использовании электростатического дефлектора
Использование флэттоп (flat-top)-системы (3-я гармоника частоты основной ВЧ-системы)	Малый радиальный размер пучка на радиусе вывода из циклотрона. Эффективный вывод пучка при использовании электростатического дефлектора. Высокое качество пучка
Большой зазор в центре циклотрона. Низкий уровень магнитного поля	Большой радиус первого оборота пучка. Достаточное пространство для размещения инжектора с высоким потенциалом на электродах. Пониженный потенциал на дефлекторе

созданию высокоэффективной системы вывода для предотвращения теплового разрушения элементов системы вывода и снижения наведенной радиоактивности.

Основные принципы разработки представлены в табл. 2.

В соответствии с данными принципами разработан проект циклотрона ДЦ-280 [2, 3].

2. КОМПОНОВКА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

Компоновка циклотрона представлена на рис. 1. Циклотронный комплекс включает в себя основной магнит, систему аксиальной инжекции с высоковольтной (ВВ) платформой [4], размещенную над основным магнитом, высокочастотную ускоряющую систему (ВЧ), которая состоит из двух основных 45° дуантов с резонаторами, работающих

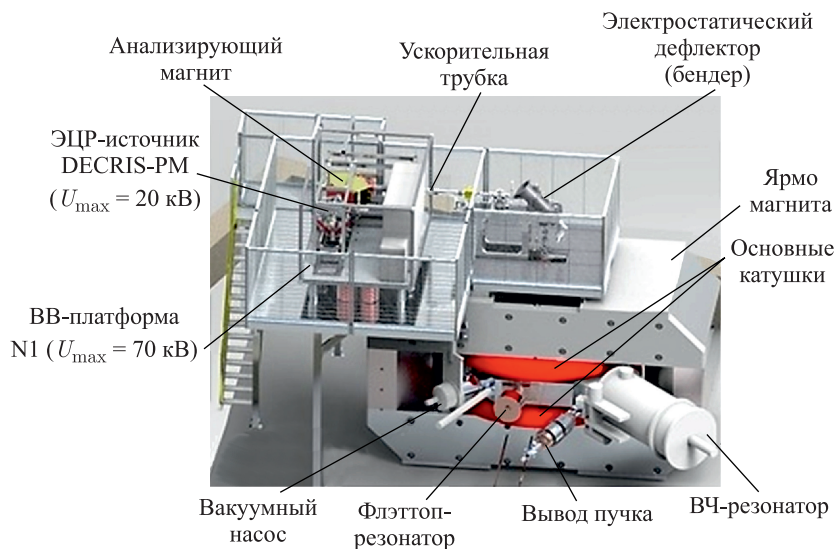


Рис. 1. Компоновка циклотрона ДЦ-280

Таблица 3. Интенсивности пучков ионов источника DECRIS-PM (в мкА частиц), полученных на стенде

Ион	5 ⁺	7 ⁺	8 ⁺	9 ⁺	10 ⁺	11 ⁺	12 ⁺	15 ⁺	17 ⁺	19 ⁺	20 ⁺	23 ⁺	26 ⁺
²⁴ Mg	90	20	5	1,7									
⁴⁰ Ar			115,8	55,6		19,1	12,8						
⁴⁰ Ca		15,7	21,9	24,4		14,4	4,8						
⁵⁰ Ti				10	7,2	5,5	1,9						
⁵⁶ Fe			8,8	9,4	8	5							
⁸⁴ Kr							13,3	12	7,4	2,6			
¹³² Xe											3,9	3	1,9

на 3-й гармонике частоты обращения частиц [5], двух дополнительных 20° флэттоп-дуантов, работающих на 3-й гармонике частоты основной ВЧ-системы [6], систему вывода пучка из циклотрона электростатическим дефлектором и систему транспортировки пучка к физическим мишеням по пяти каналам [7].

На ВВ-платформе расположены ЭЦР-источник DECRIS-PM [8], анализирующий магнит и ионная оптика. После ВВ-платформы установлены ускорительная трубка, сферический электростатический дефлектор, полигармонический банчер [9], фокусирующие соленоиды. Для поворота пучка в медианную плоскость циклотрона используется спиральный инфлектор с квадрупольной линзой [10].

В 2017 г. в ЛЯР ОИЯИ был собран на стенде и запущен ЭЦР-источник DECRIS-PM. Полученные результаты представлены в табл. 3. Интенсивность пучков ионов ⁴⁰Ca⁺⁹ составила 24,4 мкА частиц, что соответствует проектным параметрам.

2.1. Магнит циклотрона. Магнитная структура ДЦ-280, созданная на базе электромагнита (табл. 4) с диаметром полюса 4 м, предусматривает возможность глубокой вариации

Таблица 4. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-280

Диаметр полюса, м	4
Среднее магнитное поле на радиусе вывода, Тл	0,62–1,30
Вес магнита, т	1100
Максимальная мощность магнита, кВт	280

магнитного поля. В циклотроне установлены радиальные и азимутальные корректирующие катушки для коррекции распределения поля по радиусу и подавления первой гармоники.

2.2. Высокочастотная система циклотрона. В изохронном циклотроне ДЦ-280 для ускорения пучка используется основная ускоряющая система, состоящая из двух четвертьволновых резонаторов, работающих на 3-й гармонике частоты обращения ионов, и системы флэттоп-дуантов, работающих на 3-й гармонике частоты основной ускоряющей системы. Основные характеристики высокочастотной системы показаны в табл. 5.

Таблица 5. Основные характеристики ВЧ-системы

Параметр	Значение
Основная ускоряющая система	
Рабочая частота, МГц	7,32–10,38
Гармоника ускорения	3
Напряжение на дуантах, кВ	130
Флэттоп-система	
Рабочая частота, МГц	21,96–31,14
Напряжение на дуантах, кВ	13

В декабре 2018 г. была закончена сборка и наладка систем циклотрона. На рис. 2 представлен циклотрон ДЦ-280, собранный в здании фабрики сверхтяжелых элементов.

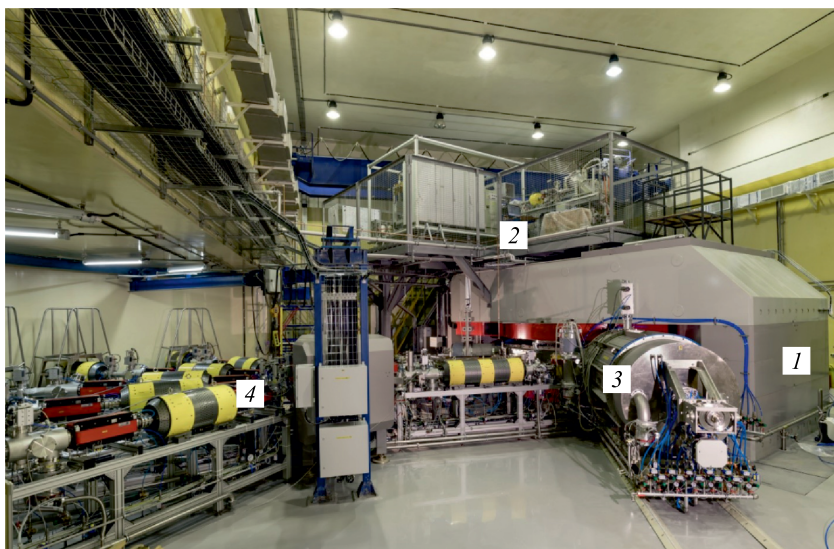


Рис. 2. Циклотрон ДЦ-280 с каналами транспортировки пучка: 1 — основной магнит циклотрона ДЦ-280; 2 — система аксиальной инъекции; 3 — ВЧ-резонатор; 4 — пять каналов транспортировки пучка

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ в циклотроне ДЦ-280 был получен 26 декабря 2018 г., и 17 января 2019 г. пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ был выведен из ускорителя в канал транспортировки ионов. Интенсивность пучка на начальной стадии запуска составляла не более 0,2 мкА частиц. Схема ускорения ионов в циклотроне ДЦ-280 представлена на рис. 3.

В качестве тестовой частицы для запуска и наладки циклотрона был выбран ион $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с отношением атомной массы к заряду $A/Z = 6$, который при энергиях 4–8 МэВ/нуклон не вызывает сильной активации узлов циклотрона.

Расчетные параметры циклотрона для ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ в тестовом режиме приведены в табл. 6. Для поворота инжектируемого пучка в медианную плоскость циклотрона использовался наладочный вариант спирального инфлектора с магнитным радиусом $R_{\text{инфл}} = 75$ мм без фокусирующей электростатической линзы на выходе. Расчетное напряжение инжекции $U_{\text{инж}} = 62,15$ кВ, напряжение на электродах сферического дефлектора $U_{\text{бэнд}} = \pm 9,3$ кВ, напряжение на электродах инфлектора $U_{\text{инфл}} = \pm 12,4$ кВ.

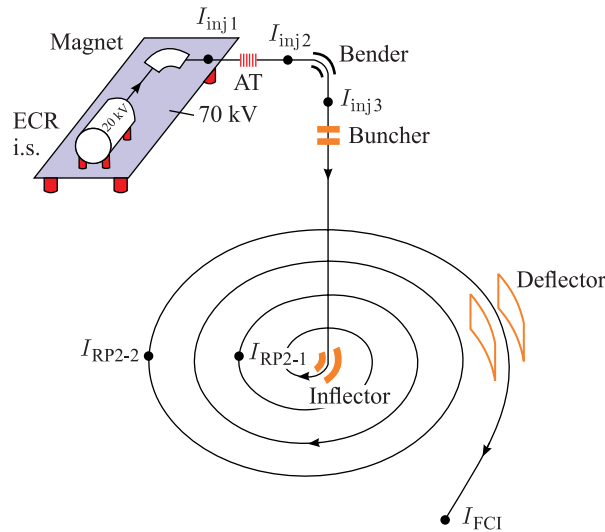


Рис. 3. Схема ускорения ионов в циклотроне ДЦ-280: ECR — источник ионов DECRIIS-PM; Magnet — анализирующий магнит; $I_{\text{inj}1}$ — ток пучка после анализирующего магнита; $I_{\text{inj}2}$ — ток пучка после ускорительной трубки (АТ); $I_{\text{inj}3}$ — ток пучка после сферического дефлектора (Bender) и полигармонического банчера (Buncher); $I_{\text{RP}2-1}$ — ток пучка на радиусе $R = 400$ мм; $I_{\text{RP}2-2}$ — ток пучка на радиусе $R = 1750$ мм; $I_{\text{FC}1}$ — ток пучка, выведенного из циклотрона электростатическим дефлектором (Deflector)

Таблица 6. Расчетные параметры ДЦ-280 для ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$

Ускоряемый ион	$^{84}\text{Kr}^{14+}$
Частота ускоряющего поля F , МГц	9,0
Индукция магнитного поля в центре циклотрона B_0 , Тл	1,1722
Энергия ионов $E_{\text{выв}}$ на радиусе вывода $R_{\text{выв}} = 1768$ мм, МэВ/нуклон	5,8

Таблица 7. Трансмиссия пучка $^{84}\text{Kr}^{+14}$ от ионного источника до канала транспортировки выведенного пучка при включенном банчере

Инжекция			Ускорение пучка в циклотроне		Канал транспортировки
Ток пучка из ионного источника, мкА	Ток пучка после высоковольтной платформы, мкА	Ток пучка в вертикальном канале инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода 1750 мм, мкА	Ток пучка в канале транспортировки выведенного пучка, мкА
~ 56	46	38,8	6,5	5,4	2,65
	84,3 %				
		14,1 %			
			83,1 %		
				49,1 %	
			5,8 %		

В пусконаладочном режиме напряжение экстракции из ЭЦР-источника DECRIS-PM было $U_{\text{ЭЦР}} = 15$ кВ, напряжение на высоковольтной платформе $U_{\text{ВВ}} = 47,2$ кВ, соответственно, энергия инъекции ионов составила $U_{\text{инж}} = 62,2$ кВ на заряд. Ток основного магнита: 853,5 А. Оптимальное напряжение на электродах сферического дефлектора составило +10 кВ и -7,7 кВ. Оптимальное напряжение на электродах инфлектора: +12,2 кВ и -11,5 кВ. Оптимальное напряжение на основных дуантах: 115–120 кВ. Напряжение на выводном электростатическом дефлекторе: -75 кВ. Средний уровень вакуума в канале инъекции был $5 \cdot 10^{-8}$ Торр, в циклотроне — $3 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Измерение тока пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ в первом блоке диагностики после анализирующего магнита было неточным из-за частичного попадания на цилиндр Фарадея (ЦФ) соседних зарядов ионов $^{84}\text{Kr}^{+13}$ и $^{84}\text{Kr}^{+15}$. Корректное измерение тока $^{84}\text{Kr}^{+14}$ производилось во втором блоке диагностики, после ускорительной трубки. Ток пучка составил $I_{\text{inj}2} = 46$ мкА (табл. 7). После поворота пучка сферическим дефлектором в вертикальную часть канала и прохождения через полигармонический банчер измеренный ток составил $I_{\text{inj}3} = 38,8$ мкА (84 % от $I_{\text{inj}2}$).

Инжектируемый пучок ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ с током 46 мкА был ускорен в циклотроне до радиуса вывода с использованием банчера и без него. Зависимость тока ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ от радиуса циклотрона показана на рис. 4.

Ускорение ионов проводилось без использования флэттоп-системы.

Эффективность захвата в ускорение определялась как отношение тока пучка на радиусе $R = 400$ мм ($I_{\text{RP}2-1}$), где расчетное фазовое движение банча стабилизируется, к току пучка на входе в вертикальный канал инъекции ($I_{\text{inj}3}$) и составила 14,1 % без банчера и 54,8 % с банчером.

Эффективность ускорения в циклотроне определялась как отношение тока пучка на радиусе вывода $R = 1750$ мм ($I_{\text{RP}2-2}$) к току на радиусе $R = 400$ мм ($I_{\text{RP}2-1}$).

Эффективность вывода из ускорителя определялась как отношение тока пучка на первом цилиндре Фарадея ($I_{\text{FC}1}$) канала транспортировки к току на радиусе вывода ($I_{\text{RP}2-2}$).

Результаты ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ без банчера и с банчером представлены в табл. 7 и 8.

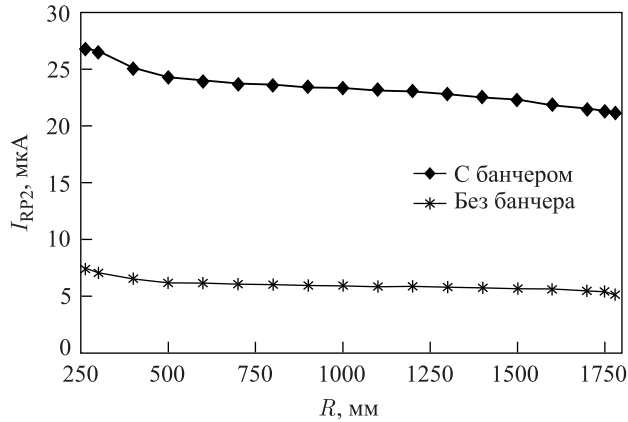


Рис. 4. Зависимость тока ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ от радиуса для тока пучка в канале инъекции 46 мкА при ускорении без банчера и с банчером, работающим на трех гармониках

Таблица 8. Трансмиссия пучка $^{84}\text{Kr}^{+14}$ от ионного источника до канала транспортировки выведенного пучка при выключенном банчере

Инъекция			Ускорение пучка в циклотроне		Канал транспортировки
Ток пучка из ионного источника, мкА	Ток пучка после высоковольтной платформы, мкА	Ток пучка в вертикальном канале инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода 1750 мм, мкА	Ток пучка в канале транспортировки выведенного пучка, мкА
~ 56	45,6	40,5	25	21,3	19
88,8 %					
		54,8 %			
			85,2 %		
				89,2 %	
41,7 %					

Полная эффективность ускорения ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ от ЭЦР-источника после сепарации по зарядам в канале инъекции (I_{inj2}) до первого цилиндра Фарадея в канале транспортировки ускоренного пучка (I_{FC1}) составила: 5,8 % без банчера и 41,7 % с банчером.

Максимальная интенсивность ускоренного пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ составила 1,36 мкА частиц ($I_{FC1} = 19$ мкА).

В качестве второй тестовой частицы был выбран ион $^{12}\text{C}^{+2}$. Отношение массы к заряду иона $A/Z = 6$, частота ускоряющего ВЧ-напряжения $F = 9$ МГц, расчетная индукция магнитного поля в центре циклотрона $B_0 = 1,1728$ Тл. Ток основного магнита при ускорении $I_M = 858,5$ А, напряжение инъекции $U_{inj} = 62,23$ кВ ($U_{ЭЦР} = 15$ кВ, $U_{ВВ} = 47,23$ кВ).

При транспортировке ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ в системе аксиальной инъекции ток пучка после анализирующего магнита был равен току после ускоряющей трубки 65,5 мкА. Эффективность транспортировки на этом участке 100%-я.

Таблица 9. Трансмиссия пучка $^{12}\text{C}^{+2}$ от ионного источника до канала транспортировки выведенного пучка при выключенном банчере

Инжекция			Ускорение пучка в циклотроне		Канал транспортировки
Ток пучка из ионного источника, мкА	Ток пучка после высоковольтной платформы, мкА	Ток пучка в вертикальном канале инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода 1750 мм, мкА	Ток пучка в канале транспортировки выведенного пучка, мкА
65,5	65,5	54,6	7,55	5,85	3,16
100 %					
	83,4 %				
		11,5 %			
			77,5 %		
	8,9 %				
				54 %	
			4,8 %		

Таблица 10. Трансмиссия пучка $^{12}\text{C}^{+2}$ от ионного источника до канала транспортировки выведенного пучка при включенном банчере

Инжекция			Ускорение пучка в циклотроне		Канал транспортировки
Ток пучка из ионного источника, мкА	Ток пучка после высоковольтной платформы, мкА	Ток пучка в вертикальном канале инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода 1750 мм, мкА	Ток пучка в канале транспортировки выведенного пучка, мкА
69,7	69,7	59,5	37,8	31,3	20
100 %					
	85,4 %				
		54,2 %			
			82,8 %		
	44,9 %				
				63,7 %	
			28,7 %		

Результаты ускорения ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ при использовании банчера и без него представлены в табл. 9 и 10. Зависимость тока ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от радиуса ускорения в циклотроне приведена на рис. 5 для инжектируемых токов пучка 65,5 мкА (без банчера) и 69,7 мкА (с банчером).

Трансмиссия пучка ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от ЭЦР-источника (I_{inj2}) до радиуса вывода в циклотроне составила 8,9 % без банчера и 44,9 % с банчером. Полная эффективность ускорения ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от ЭЦР-источника (I_{inj2}) до первого цилиндра Фарадея на выводе (I_{FC1}) составила 4,8 % без банчера и 28,7 % с банчером. Оптимизация режима вывода пучка ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ дефлектором при ускорении с банчером не проводилась, тем не менее, в канале транспортировки была получена максимальная интенсивность ускоренного пучка ионов 10 мкА частиц ($I_{FC1} = 20$ мкА).

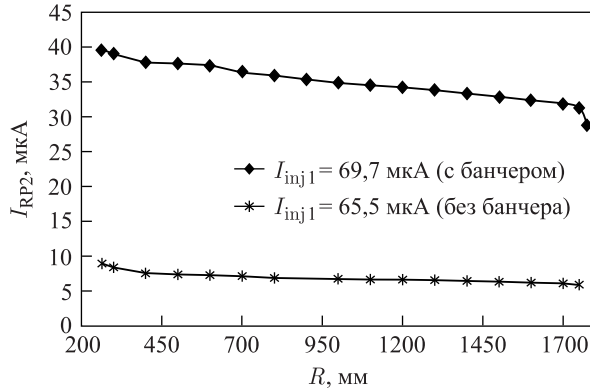


Рис. 5. Зависимость тока ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от радиуса для токов инжектируемого пучка $I_{inj1} = 65,5$ мкА (без банчера) и $I_{inj1} = 69,7$ мкА (с банчером)

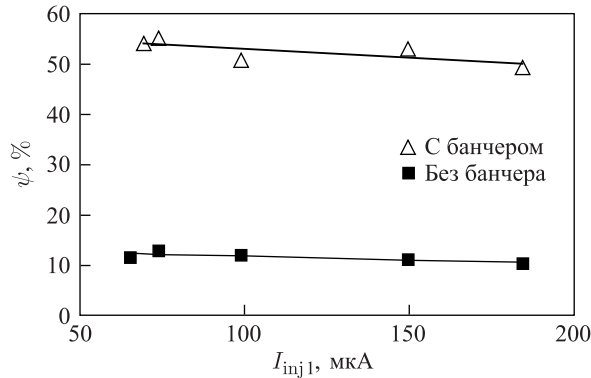


Рис. 6. Эффективность захвата ионов в ускорение ψ , измеренная на радиусе $R_{RP2} = 400$ мм при различных значениях тока пучка на инъекции I_{inj1}

Интенсивность инжектируемого пучка влияет на эффективность транспортировки по каналу инъекции и захват пучка в ускорение. При увеличении тока пучка $^{12}\text{C}^{+2}$ из источника ионов с 65,5 до 184,5 мкА эффективность захвата пучка в ускорение при выключенном банчере уменьшается с 12,9 до 10,4 %, при работающем банчере с 55,1 до 49,3 % (рис. 6).

Зависимости тока пучка ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от радиуса при ускорении в циклотроне для различных токов инъекции при включенном и выключенном банчере представлены на рис. 7.

Экспериментально наблюдается зависимость эффективности прохождения горизонтальной части канала инъекции с ускорением в ускорительной трубке ($\xi = I_{inj2}/I_{inj1}$) от величины тока инжектируемого пучка. Для ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ зависимость более слабая, чем для ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ (рис. 8). Это может быть связано как с меньшими потерями на остаточном газе для ионов $^{12}\text{C}^{+2}$, так и с различием апертурных потерь ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ и $^{12}\text{C}^{+2}$, из-за разных исходных параметров пучков.

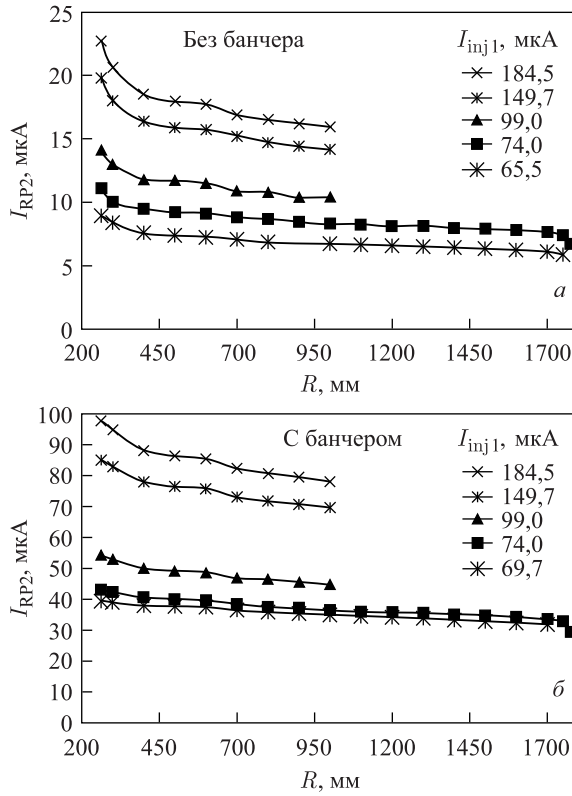


Рис. 7. Зависимость тока пучка ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ от радиуса при ускорении в циклотроне для различных токов инжектируемого пучка при выключенном банчере (а) и включенном банчере (б). Для токов выше $I_{inj1} = 74$ мкА ускорение проводилось только до радиуса 1 м для предотвращения активации оборудования циклотрона на этапе наладки

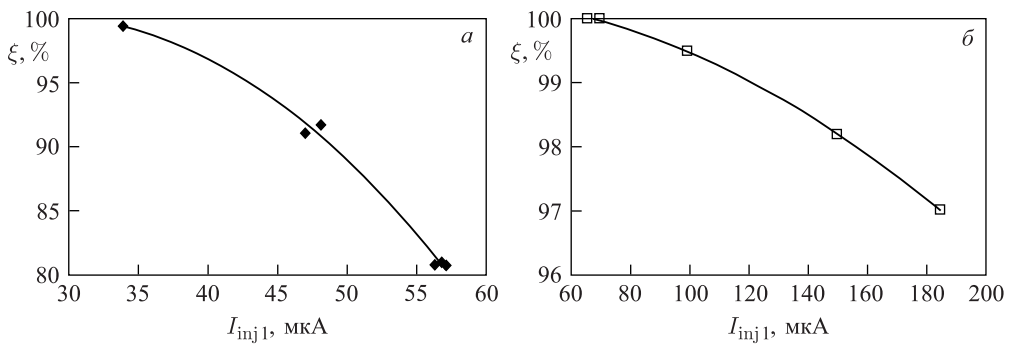


Рис. 8. Эффективность транспортировки пучков ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ (а) и $^{12}\text{C}^{+2}$ (б) по горизонтальной части канала инъекции с ускорением в ускорительной трубке в зависимости от тока инжектируемого пучка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Запущен новый ускоритель тяжелых ионов циклотрон ДЦ-280 — базовая установка фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ. На стадии запуска получены интенсивности ускоренных и выведенных пучков ионов $^{84}\text{Kr}^{+14}$ — 1,36 мкА частиц, ионов $^{12}\text{C}^{+2}$ — 10 мкА частиц.

Полученная полная эффективность ускорения и вывода пучка составила 30–40 %. Для достижения проектной эффективности ускорения (более 50 %) и получения интенсивностей пучков ионов средних масс ($A \sim 50$) более 10 мкА частиц проводится доработка и наладка узлов и систем циклотрона. Одной из основных задач является улучшение уровня вакуума в камере циклотрона до $(6-8) \cdot 10^{-8}$ Торр путем устранения микротечей. В центре циклотрона в настоящее время устанавливается штатный инфлектор с фокусирующей электростатической линзой на выходе. Для улучшения эффективности вывода проводятся работы по вводу в эксплуатацию флэттоп системы. Будет проведена оптимизация режимов ускорения и вывода. Из ЭЦР-источника DECRIS-PM должны быть получены ионы $^{48}\text{Ca}^{+9}$ с интенсивностью более 20 мкА частиц.

Первые эксперименты на новом ускорительном комплексе запланированы на вторую половину 2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu. Status and Perspectives of the Dubna Superheavy Element Factory // Proc. of the Nobel Symp. “NS 160”. EPJ Web Conf. 2016. V. 131. P. 08001.
2. Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Oganessian Yu. Ts., Gikal B. N., Kalagin I. V., Semin V. A., Bogomolov S. L., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Yu., Ivanov G. N., Osipov N. F. The New DC-280 Cyclotron. Status and Road Map // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 809–813.
3. Kalagin I. V., Gulbekian G. G., Dmitriev S. N., Oganessian Yu. Ts., Gikal B. N., Bogomolov S. L., Ivanenko I. A., Kazarinov N. Yu., Semin V. A., Ivanov G. N., Osipov N. F. Heavy Ion Cyclotrons of FLNR JINR — Status and Plans // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, 2018. P. 60–64.
4. Гульбежян Г. Г., Гикал Б. Н., Бехтерев В. В., Богомолов С. Л., Ефремов А. А., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Мельников В. Н., Осипов Н. Ф., Прохоров С. В., Тихомиров А. В., Хабаров М. В. Проект системы аксиальной инжекции для циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 6(190). С. 1181–1186.
5. Гульбежян Г. Г., Зарубин В. Б., Карамышева Г. А., Карамышев О. В., Франко Й. Высокочастотная ускоряющая система циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 8. С. 89–97.
6. Гульбежян Г. Г., Бузмаков В. А., Зарубин В. Б., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Карамышева Г. А., Франко Й. «Flat-top» система циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 4(181). С. 587–602.
7. Gulbekyan G. G., Gikal B. N., Ivanov G. N., Kalagin I. V., Kazacha V. I., Kazarinov N. Yu., Khabarov M. V., Melnikov V. N., Osipov N. F., Tikhomirov A. V., Teterev Y. G. The Project of the Beam Transportation Lines for the DC-280 Cyclotron at the JINR FLNR // Proc. of RUPAC-2014, Obninsk, Russia, 2014. P. 336–338.
8. Bogomolov S. L., Bondarchenko A. E., Efremov A. A., Kuzmenkov K. I., Lebedev A. N., Mironov V. E., Loginov V. N., Yazvitsky N. Yu., Konev N. N. Production of High-Intensity Ion Beams from the DECRIS-PM-14 ECR Ion Source // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 878–881.

9. *Kalagin I. V., Gulbekian G. G., Gikal B. N., Prokhorov S. V., Pchelkin N. N.* Multigap and Polyharmonic Bunching Systems at FLNR Cyclotrons // Proc. of RuPAC-2016, St. Petersburg, Russia, 2016. P. 446–448.
10. *Gulbekian G., Ivanenko I., Kazarinov N., Samsonov E.* Injection and Acceleration of Intense Heavy Ion Beams in JINR New Cyclotron DC-280 // Proc. of HIAT2015, Yokohama, Japan, 2015. P. 1–3.

Получено 7 июня 2019 г.