

СОЗДАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА ДЦ-140 НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ДЦ-72

*И. А. Иваненко¹, Г. Г. Гульбекян, Н. Ю. Казаринов,
И. В. Калагин, Й. Франко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ведутся работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-140, предназначенного для решения широкого круга прикладных задач. Одним из основных направлений работы комплекса будет производство ядерных фильтров и тестирование микросхем на радиационную устойчивость. На циклотроне ДЦ-140 будет осуществляться ускорение пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду A/Z от 5 до 8 до фиксированной энергии 2,1 и 4,8 МэВ/нуклон. Циклотрон ДЦ-140 будет создан за счет глубокой реконструкции циклотрона ДЦ-72. В частности, предполагается использовать магнитную систему ДЦ-72 для получения новых режимов ускорения. В работе приводятся основные параметры магнитных систем ДЦ-72 и ДЦ-140, результаты расчетов и магнитных измерений, а также приводится оценка возможности формирования новых режимов ускорения при минимальных изменениях в имеющейся магнитной системе ДЦ-72.

At the present time, the activities on creation of the new multipurpose isochronous cyclotron DC-140 are carried out at the FLNR, JINR. The cyclotron DC-140 is intended for microchip testing, production of track pore membranes and for applied physics. The cyclotron will accelerate the heavy ions with mass-to-charge ratio A/Z from 5 to 8 up to the fixed energies 2.1 and 4.8 MeV per nucleon. The new cyclotron DC-140 will be created as a deep reconstruction of DC-72 cyclotron. The main system of the new DC-140 cyclotron, the electromagnet of DC-72, will be adopted for new tasks. In the present work the parameters of the magnet, the results of magnetic field calculations and measurements, and possibility of formation of new operational modes are presented.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Основой ускорительного комплекса ЛЯР ОИЯИ являются циклотроны У400 и У400М, которые используются для реализации как научной, так и различных прикладных программ [1]. Общее время работы этих ускорителей составляет более 10000 ч в год, из которых 3000 ч занимают эксперименты в прикладном направлении, и прежде всего это работы, связанные с проведением тестирования микросхем на радиационную устойчивость пучками тяжелых ионов. Время на облучение микросхем постоянно растет и за последний год достигло 2500 ч.

¹E-mail: ivan@jinr.ru

Исследования по физике твердого тела и модификации поверхности материалов, а также производство ядерных фильтров осуществляются на ускорительном комплексе ИЦ-100, который позволяет ускорять пучки тяжелых ионов Ag, Kг, Хе до энергии 1,2 МэВ/нуклон, что позволяет проводить облучение полимерных пленок толщиной до 20 мкм. Время работы циклотрона ИЦ-100 составляет более 3500 ч в год.

Приоритет в выполнении основной научной программы лаборатории, расширение области прикладных задач, а также необходимость в проведении реконструкции циклотронов У400 и У400М ставят вопрос о создании в ЛЯР ОИЯИ специализированного ускорительного комплекса для решения широкого круга прикладных задач.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЦ-140

В настоящее время в ЛЯР ОИЯИ ведутся работы по созданию ускорительного комплекса ДЦ-140 [2]. Одним из основных направлений работы комплекса будет производство ядерных фильтров и тестирование микросхем на радиационную стойкость. Новый ускорительный комплекс ДЦ-140 должен решить следующие задачи:

- разгрузить основные циклотроны У400 и У400М от прикладных задач для выполнения основной научной программы лаборатории;
- увеличить энергию пучков тяжелых ионов для производства ядерных фильтров до 2 МэВ/нуклон, что позволит облучать полимерные пленки толщиной до 30 мкм;
- обеспечить энергию 4,8 МэВ/нуклон пучков тяжелых ионов для тестирования микросхем на радиационную стойкость.

Ускорительный комплекс должен отличаться простотой в управлении, обеспечивать высокую временную стабильность и быстрый переход между режимами ускорения. Так, для смены типа ионов в коктейле Ne, Ag, Kг, Хе выделяется время не более 30 мин. Переход между остальными режимами ускорения должен занимать не более 6 ч.

Существенным является экономический фактор. Ускорительный комплекс должен обеспечить низкую себестоимость работы и обслуживания. Предполагаемое время работы более 6000 ч в год.

Исходя из требований к новому ускорительному комплексу предложено создать изохронный циклотрон компактного типа, обеспечивающий ускорение ионов от кислорода до висмута до фиксированных энергий 2,1 и 4,8 МэВ/нуклон. Фиксация значения энергии дает возможность использовать генератор с постоянной частотой, что значительно ускоряет процесс смены режимов работы. Переход от одного режима ускорения к другому будет осуществляться только за счет оперативной подстройки токов в основной и корректирующих катушках магнитной системы циклотрона.

Фиксированные значения энергии предполагают работу ускорительного комплекса в двух основных режимах. В первом режиме ускоренные пучки ионов с отношением массы к заряду от 7,35 до 8,25 до энергии 2,1 МэВ/нуклон будут использоваться для производства трековых мембран. В этом режиме работы ускорение будет осуществляться на третьей гармонике ВЧ-напряжения при частоте вращения ионов 2,877 МГц. Во втором режиме ускоренные пучки ионов с отношением массы к заряду от 4,9 до 5,5 до энергии 4,8 МэВ/нуклон будут использоваться для тестирования микросхем на

радиационную устойчивость. В этом режиме работы ускорение будет осуществляться на второй гармонике ВЧ-напряжения при частоте вращения ионов 4,316 МГц. Оба режима также будут использоваться для исследования проблем физики твердого тела и модификации поверхности материалов. Частота задающего генератора фиксирована и равна 8,632 МГц. Переход от одного режима ускорения к другому обеспечивается вариацией уровня магнитного поля от 1,37 до 1,55 Тл.

В связи с закрытием в 2018 г. проекта «Циклотронный центр Словацкой Республики» и передачей оборудования в ОИЯИ принято решение об использовании ускорительного комплекса ДЦ-72 в качестве основы для создания ДЦ-140. В настоящее время ведутся расчетные и проектные работы по адаптации систем ускорительного комплекса ДЦ-72 под выполнение поставленных задач в рамках проекта ДЦ-140.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-140 (ДЦ-72)

Электромагнит ДЦ-72 компактного типа [2] имеет Ш-образную форму и является достаточно экономичным с уровнем потребления электроэнергии не более 55 кВт (рис. 1). Изохронное распределение магнитного поля создается четырьмя парами прямых 45°-х секторов. Оперативная подстройка магнитного поля осуществляется 10 радиальными и 4 азимутальными корректирующими катушками, размещенными в зазоре между полюсом и секторами. Особенностью электромагнита ДЦ-72 являлось вертикальное размещение полуволновых резонаторов ВЧ-системы в отверстиях, проходящих через ярмо и полюсы. Для сохранения периодичности магнитной структуры в верхней и нижней частях ярма имеются по четыре вертикальных отверстия. Основные параметры магнитной системы циклотрона приведены в таблице.

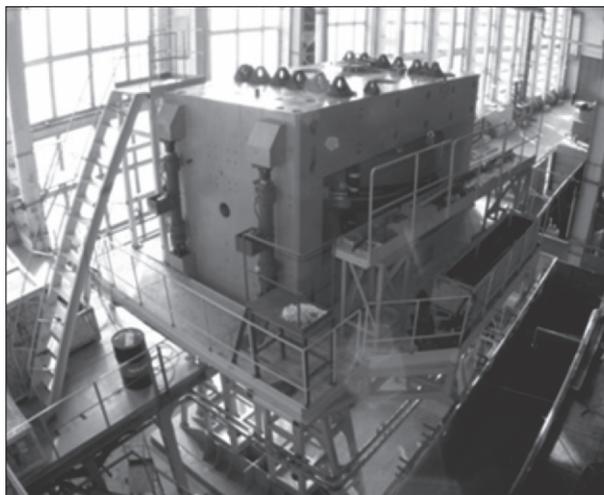


Рис. 1. Электромагнит циклотрона ДЦ-72 на испытательном стенде ОИЯИ

Основные параметры магнита циклотрона ДЦ-140 (ДЦ-72)

Параметр	Значение
Размер магнита, мм	5600 × 2700 × 3100
Диаметр полюса, мм	2600
Зазор между полюсами, секторами, мм	208, 60
Количество секторов на полюсе	4
Угловая протяженность сектора, °	45
Количество радиальных и азимутальных катушек	10 и 4
Мощность основной обмотки, кВт	38–55
Мощность корректирующих катушек, кВт	До 12

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДЦ-140 (ДЦ-72)

При проектировании нового ускорительного комплекса вопрос применимости магнитной системы ДЦ-72 для создания циклотрона ДЦ-140 является ключевым. В основе решения этого вопроса лежит база данных расчетов и измерений, полученная при создании ДЦ-72 [3]. На рис. 2 представлены значения изохронного радиального роста среднего магнитного поля, соответствующие области режимов ускорения циклотронов ДЦ-72 и ДЦ-140. Линией отмечен радиальный рост сформированного магнитного поля, получаемого на электромагните ДЦ-72. Из рисунка видно, что для получения изохронной формы магнитного поля для режимов ускорения ДЦ-140 необходимо оперативно изменить радиальный рост магнитного поля на величину до 300 Гс. Эта коррекция достигается за счет 10 радиальных корректирующих катушек, дающих вклад в основное поле более 100 Гс на катушку (рис. 3).

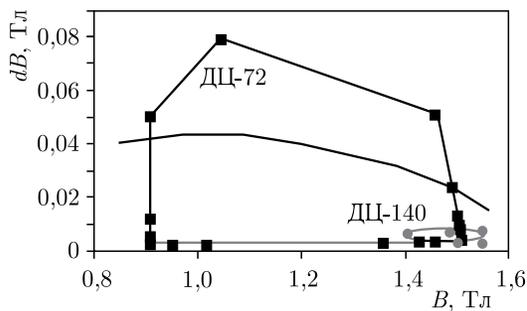


Рис. 2. Изохронный радиальный рост среднего магнитного поля, соответствующий области режимов ускорения циклотронов ДЦ-72 и ДЦ-140. Линией отмечен радиальный рост сформированного магнитного поля, получаемого на электромагните ДЦ-72

Имеющиеся результаты магнитных измерений использованы для расчетов параметров режимов ускорения ДЦ-140, которые показали, что магнитная система ДЦ-72 способна сформировать необходимое ведущее и фокусирующее магнитное поле. На рис. 4 представлен результат расчетного формирования изохронного поля с использованием радиальных корректирующих катушек при ускорении пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{38+}$ до

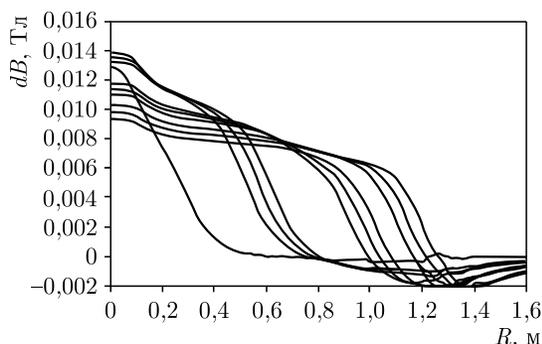
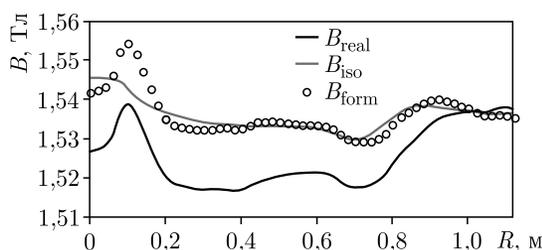


Рис. 3. Поля корректирующих катушек ДЦ-140 (ДЦ-72), ток питания 35 А

Рис. 4. Радиальное распределение магнитных полей в режиме ускорения $^{209}\text{Bi}^{38+}$ до энергии 4,8 МэВ/нуклон. B_{real} — поле без коррекции катушками, B_{iso} — изохронное поле, B_{form} — поле, сформированное радиальными корректирующими катушками

энергии 4,8 МэВ/нуклон. При этом фазовое отклонение ускоряемого пучка относительно фазы ВЧ-напряжения не превышает $\pm 10^\circ$. Ускорение проходит вдали от опасных резонансов при значениях частот бетатронных колебаний $Q_r \approx 1,02$, $Q_z \approx 0,36$. Представленные результаты характерны и для других режимов ускорения ДЦ-140.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование существующей магнитной системы циклотрона ДЦ-72 для нового циклотрона ДЦ-140 позволяет сформировать необходимое ведущее и фокусирующее магнитное поле и обеспечить ускорение ионов с $A/Z = 7,35-8,25$ до энергии 2,1 МэВ/нуклон и ионов с $A/Z = 4,9-5,5$ до энергии 4,8 МэВ/нуклон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gulbekyan G. et al.* Development of FLNR JINR Heavy Ions Accelerator Complex (DRIBs III) // Proc. of the 21st Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Zurich, Switzerland, Sept. 11–16, 2016.
2. *Gulbekyan G. et al.* Conceptual Design of FLNR JINR Radiation Facility Based on DC130 Cyclotron // Proc. of the 61st Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 2018.
3. *Gulbekyan G. et al.* DC-72 Cyclotron Magnetic Field Formation // Proc. of the 19th Russ. Accelerator Conf. Dubna, 2004.