

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.3.038.612

### РАЗРАБОТКА ЭЦР-ИСТОЧНИКА ИОНОВ DECRIS-5M ДЛЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЦ-140

© 2025 г. Д. К. Пугачев<sup>а</sup>, \*, С. Л. Богомолов<sup>а</sup>, А. Е. Бондарченко<sup>а</sup>, К. И. Берестов<sup>а</sup>,  
К. И. Кузьменков<sup>а</sup>, В. Н. Логинов<sup>а</sup>, А. Н. Лебедев<sup>а</sup>, В. Е. Миронов<sup>а</sup>, Д. С. Подойников<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, 1412980 Россия

\*E-mail: pugachev@jinr.ru

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Циклотронный комплекс ДЦ-140, создаваемый в Лаборатории ядерных реакций (ЛЯР), предназначен для проведения широкого круга прикладных исследований с использованием ускоренных пучков тяжелых ионов – радиационная физика твердого тела, разработка и производство трековых мембран (ядерных фильтров), изучение радиационной стойкости электронных компонентов и ряд других актуальных задач. Для проведения экспериментов ускоритель должен обеспечивать получение ускоренных пучков ионов с двумя фиксированными энергиями – 2.1 МэВ/нуклон и 4.8 МэВ/нуклон в диапазоне масс от Ne до Bi и интенсивностью до  $10^{12}$  част./с (для ионов Xe) на мишени. В соответствии с рабочей диаграммой циклотрона ДЦ-140 источник ионов должен обеспечивать получение пучков ионов с отношением массы к заряду в диапазоне  $A/Z = 5–8$  ( $\text{Ne}^{4+}$ – $\text{Bi}^{38+}$ ).

**Ключевые слова:** ЭЦР источник, ионы, магнитное поле, циклотрон

**DOI:** 10.56304/S2079562925010178

#### ВВЕДЕНИЕ

В реализации научной программы ЛЯР Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) одним из приоритетных направлений является запуск нового ускорительного комплекса, предназначенного для решения актуальных прикладных задач. В частности, работа циклотронного комплекса ДЦ-140 [1] будет сфокусирована на разработке и производстве полимерных трековых мембран, исследовании радиационной стойкости электронных компонентов, а также на исследованиях в области физики твердого тела. Для экспериментов, планируемых на ускорительном комплексе ДЦ-140, рабочий диапазон  $A/Z$  ионов лежит в интервале от 5 до 8.25, что требует получения таких ионов как  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{4+}$ ,  $\text{Ar}^{8+}$ ,  $\text{Fe}^{11+}$ ,  $\text{Kr}^{16+}$ ,  $\text{Xe}^{24+}$ ,  $\text{Au}^{36+}$  и  $\text{Bi}^{38+}$ .

В качестве инжектора заряженных частиц для ускорителя ДЦ-140 будет использован новый ЭЦР источник DECRIS-5M (рис. 1), прототипом для создания которого служит ЭЦР источник, разработанный для проекта ускорительного комплекса ДЦ-110 [2]. Основные параметры нового источника представлены в табл. 1.

#### ОПИСАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА

Для формирования аксиального магнитного поля используется две пары соленоидов в области инжекции и экстракции источника, которые питаются от независимых источников с максимальным током до 1250 А при напряжении до 80 В. Коррекция минимума магнитного поля ( $B_{\min}$ ) обеспечивается

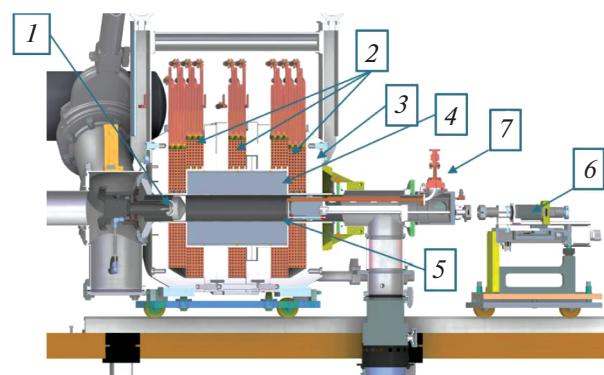


Рис. 1. Поперечный разрез ЭЦР-источника ионов DECRIS-5M: 1, система экстракции; 2, соленоиды; 3, ярмо из мягкого железа; 4, гексапольный магнит; 5, лазменная камера; 6, устройство ввода твердых веществ; 7, волновод.

**Таблица 1.** Параметры ЭЦР источника DECRIS-5M

Рабочая частота	18 ГГц
Мощность СВЧ нагрева	≤2 кВт
Магнитное поле со стороны инжекции	2.5 Тл
Магнитное поле со стороны экстракции	1.4 Тл
Радиальное магнитное поле	1.3 Тл
Внутренний диаметр плазменной камеры	74 мм
Количество соленоидов	5
Максимальный ток источника питания соленоидов в области инжекции/экстракции	1250 А
Максимальный ток источника питания соленоидов в центральной области	800 А
Давление охлаждающей воды	15 атм.
Максимальное потребление мощности	160 кВт

печивается соленоидом, расположенным в центральной области источника, который запитан от отдельного источника с током до 800 А. Медный проводник, используемый в обмотках, имеет размеры 8 × 8 мм, с центральным отверстием Ø5 мм для подачи охлаждающей воды. Максимальная потребляемая мощность магнитной системы составляет 160 кВт, при этом, давление охлаждающей воды, обеспечивающей рабочую температуру проводника, не превышает значения 15 атм.

Радиальное магнитное поле источника DECRIS-5M формируется магнитной системой со структурой Хальбаха и представляет собой гексапольный магнит, состоящий из 24 трапецидальных секторов с соответствующим направлением намагничивания (рис. 2).

Материалы секторов выбраны в соответствии со значениями внешних размагничивающих полей, создаваемых соленоидами. Подробное описание принципа выбора материалов приведено в работе [3]. Необходимая величина магнитного поля на радиусе 37 мм (стенка плазменной камеры) составляет 1.3 Т.

**Рис. 2.** Гексапольный магнит.

Внутренний диаметр магнита – 80 мм, внешний диаметр – 210 мм. Длина магнита – 300 мм.

## МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения радиальных магнитных полей гексапольного магнита проведены с помощью автоматизированного магнитометра с калиброванным датчиком Холла. Измерения магнитного поля вдоль полюсов проведены с шагом по оси  $z = 1$  мм, на расстоянии 3 мм от внутренней поверхности гексапольного магнита, азимутальные распределения магнитного поля измерены с шагом по оси  $z = 2$  мм и шагом по углу – 1°. Сравнение расчетных измеренных распределений представлены на рис. 3. Отклонение расчетных значений от результатов измерений не превышает 3% (рис. 4). Для расчета использовалась программа Comsol Multiphysics [4].

Осьное магнитное поле, создаваемое соленоидами, измерено при максимальных рабочих токах, при которых создается необходимое распределение магнитного поля. Произведена оценка влияния изменения тока соленоида, расположенного в центральной области источника, на поля в области инжекции и экстракции. Изменение величины максимумов магнитного поля, при изменении тока, подаваемого на центральный соленоид, минимально и не превышает 1%. Помимо этого, проведены измерения осевого магнитного поля со вставкой из мягкого железа внутри плазменной камеры. Результаты измерений представлены на рис. 5 и 6.

## ОПИСАНИЕ УЗЛОВ ИСТОЧНИКА

Узел инжекции включает в себя вставку из мягкого железа конической формы для повышения уровня магнитного поля в области инжекции ионного источника. Данный элемент имеет продольные канавки, по внешнему диаметру, для увеличения эффективности откачки излишков нейтральных атомов из плазменной камеры. По-

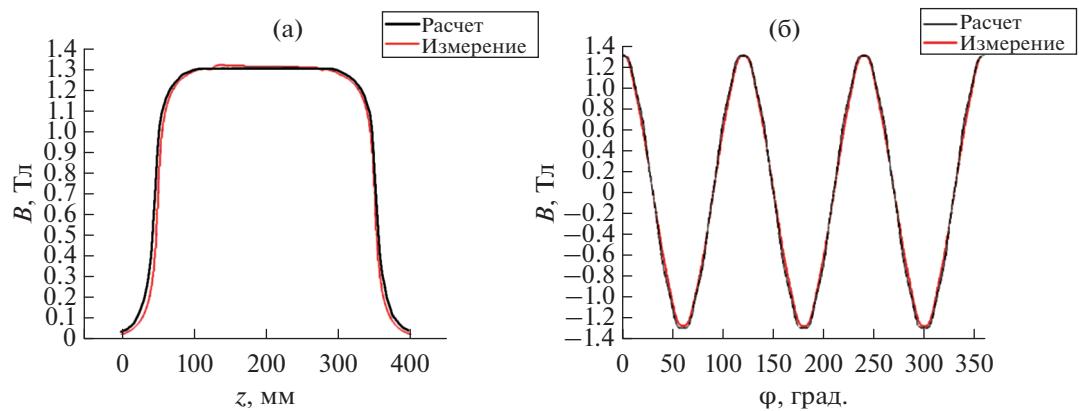


Рис. 3. Осевое (а) и азимутальное (б) распределение радиального магнитного поля гексаполя ЭЦР источника ионов DECRIS-5M на радиусе 37 мм.

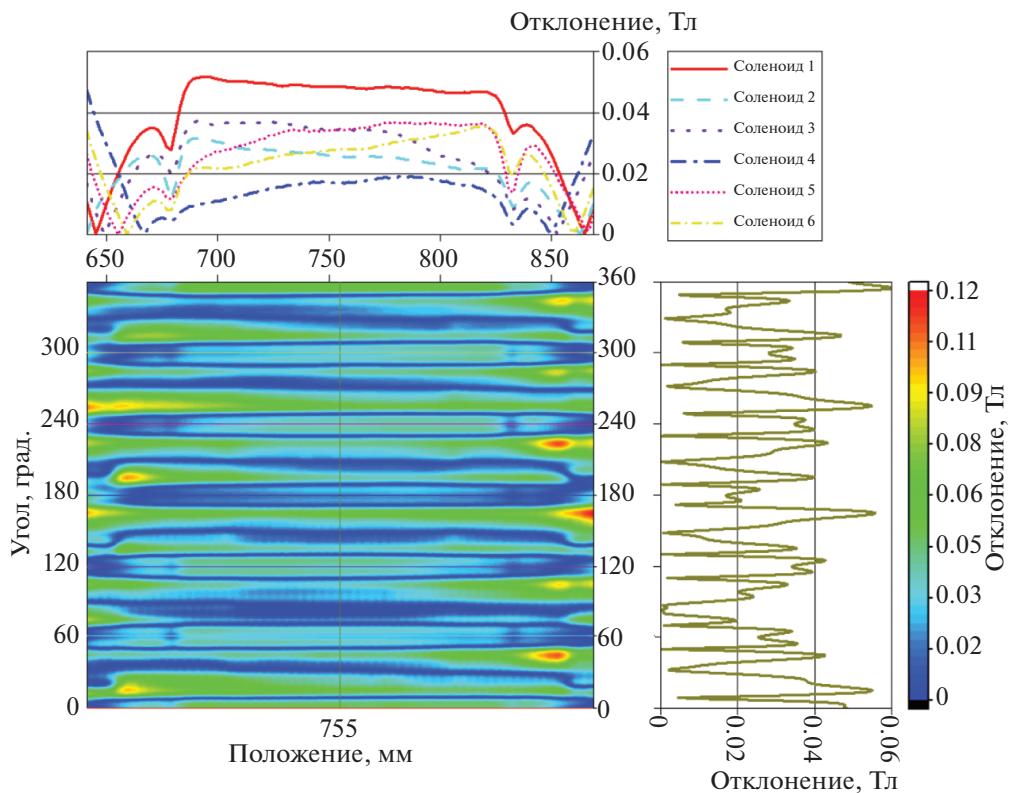


Рис. 4. Отклонения измеренных значений магнитного поля от расчетных значений.

дача СВЧ мощности 18 ГГц осуществляется через стандартный волновод с размерами  $16 \times 8$  мм, установленного на медной охлаждаемой пластине. Узел инжекции представлен на рис. 7. Конструкция позволяет использовать различные методы подачи вещества (испарение, MIVOC, распыление) в плазменную камеру ЭЦР источника для получения ионов газов и твердых веществ.

Система экстракции ионов ЭЦР источника DECRIS-5M (рис. 8) представляет собой трех элек-

тродную систему “ускорение–замедление”. Электрод с отрицательным потенциалом ( $U_{\text{до}} -5$  кВ) и электрод, находящийся на потенциале “земли” механически соединены между собой керамическими изоляторами и установлены на механизме с ручным приводом, который позволяет перемещать электроды в диапазоне  $\pm 13$  мм вдоль оси экстракции ионов. Диаметр апертуры плазменного электрода составляет 10 мм. Рабочее напряжение экстракции источника ионов варьируется в ди-

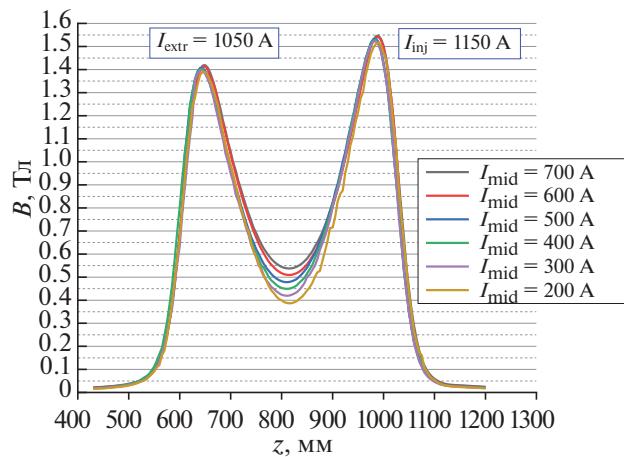


Рис. 5. Осевое распределение магнитного поля, создаваемое соленоидами.

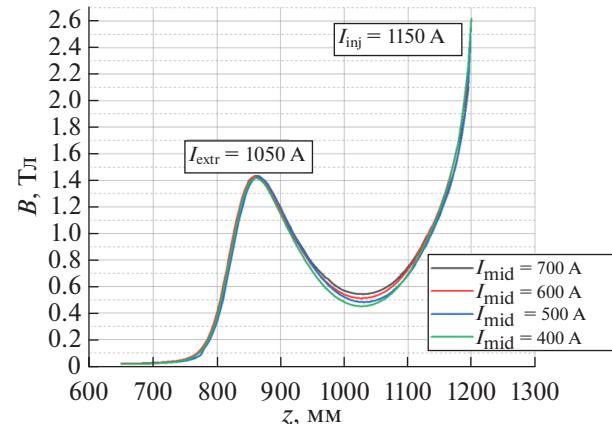


Рис. 6. Осевое распределение магнитного поля, создаваемое соленоидами, при размещении вставки из мягкого железа в плазменной камере ионного источника.

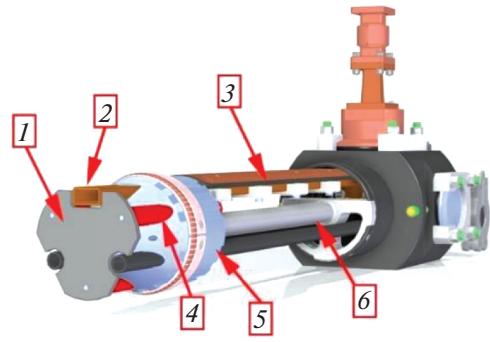


Рис. 7. Узел инжекции источника DECRIS-5M: 1, biased-электрод; 2, волновод; 3, охлаждение волновода; 4, изоляторы; 5, вставка из мягкого железа; 6, держатель.

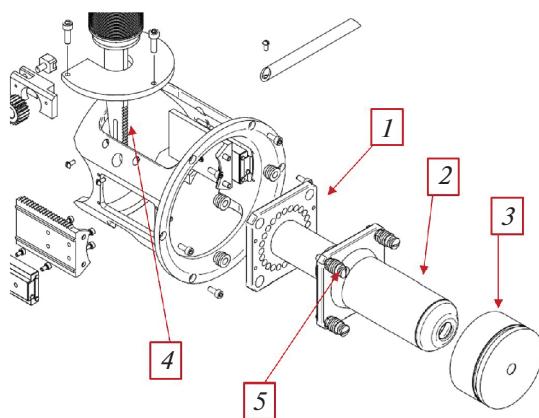


Рис. 8. Система экстракции источника DECRIS-5M: 1, электрод под потенциалом “земли”; 2, электрод под отрицательным потенциалом; 3, электрод под положительным потенциалом источника ионов; 4, механизм для передвижения электродов относительно ЭЦР источника; 5, изоляторы.

пазоне от 10 до 25 кВ. Оптимальное напряжение, подаваемое на электроды, выбирается в процессе настройки, в зависимости от необходимого зарядового состояния и тока получаемого иона.

Для защиты гексапольного магнита от перегрева плазменная камера (рис. 9) выполнена в виде цилиндра с двойными стенками, между которыми имеется двухзаходная спиральная канавка для протока охлаждающей воды. Данная структура охлаждения камеры увеличивает эффективность отвода тепловой энергии в несколько раз по сравнению с камерой с прямыми канавками. Толщина плазменной камеры составляет 3 мм, внешний диаметр соответствует диаметру гексапольного магнита – 80 мм. Охлаждение плазменной камеры и волновода источника ECR осуществляется от отдельного модуля, изолированного от общей системы охлаждения циклотрона через теплообменный контур. Давление охлаждающей воды не превышает значения 5 атм.

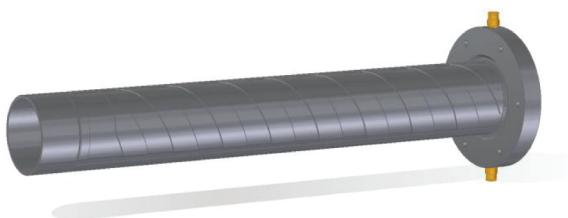


Рис. 9. Плазменная камера с двухсторонними спиральными канавками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент завершена полная сборка ЭЦР источника, выполнены магнитные измерения аксиального и радиального магнитного поля источника. Источник установлен на испытательном стенде, проведена вакуумная откачка плазменной камеры. Достигнуты рабочие значения вакуума  $8 \cdot 10^{-8}$  торр и  $3 \cdot 10^{-8}$  торр в области инжекции и экстракции источника, соответственно.

Испытания ЭЦР источника на испытательном стенде планируется проводить до окончания монтажа и проверки основных технических систем ускорителя ДЦ-140. По окончанию испытаний, источник будет смонтирован на платформу аксиальной инжекции ускорителя ДЦ-140, с последующим повторным испытанием всех систем установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Mitrofanov S.V. et al.* // Proc. 22nd Conf. Cyclotrons and Their Applications. Cape Town, South Africa. 2019. Geneva: JACoW Publ. P. 358–360. <https://doi.org/10.18429/JA-CoW-CYCLOTRONS2019-FRB02>
2. *Gikal B.N., Dmitriev S.N., Gul'bekyan G.G., et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11. P. 137–150. <https://doi.org/10.1134/S1547477114020204>
3. *Pugachev D.K. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. P. 331–336. <https://doi.org/10.1134/S1547477124700213>
4. COMSOL. <https://www.comsol.com/>.

## Development of the ECR Ion Source DECRIS-5M for the Cyclotron Complex DC-140

**D. K. Pugachev<sup>1</sup>, \*, S. L. Bogomolov<sup>1</sup>, A. E. Bondarchenko<sup>1</sup>, K. I. Berestov<sup>1</sup>, K. I. Kuzmenkov<sup>1</sup>, V. N. Loginov<sup>1</sup>, A. N. Lebedev<sup>1</sup>, V. E. Mironov<sup>1</sup>, and D. S. Podoinikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

\*e-mail: [pugachev@jinr.ru](mailto:pugachev@jinr.ru)

Received May 7, 2024; revised May 7, 2024; accepted May 21, 2024

**Abstract**—The cyclotron complex DC-140, which is under development at the Laboratory of Nuclear Reactions, is designed to solve a wide range of applied research with the use of heavy ions accelerated beams. The research works on radiation physics, radiation resistance of materials and the production of track membranes are planned. Following the requirements of experiments DC-140 should accelerate the heavy ions up to fixed energies 2.1 and 4.8 MeV per unit mass in a wide mass range from Ne to Bi with the intensity up to  $10^{12}$  particles per second (for Xe ions). In accordance with the working diagram of DC-140 cyclotron the ion source should provide the ion beams with mass-to-charge ratio  $A/Z$  of the range from 5 to 8 (from  $\text{Ne}^{4+}$  to  $\text{Bi}^{38+}$ ).

**Keywords:** ECR source, ions, magnetic field, cyclotron