

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕКСАПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ЭЦР-ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

*Д. К. Пугачев, С. Л. Богомолов, А. Е. Бондарченко, К. И. Берестов,  
К. И. Кузьменков, А. А. Ефремов, В. Н. Логинов, В. Е. Миронов,  
А. А. Протасов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Целью данной работы является поиск оптимальной конструкции и расположения магнитов для обеспечения требуемого распределения магнитного поля в плазменной камере источника электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) на примере источника DECRIS-5M. Проводится исследование влияния внешних магнитных полей, создаваемых соленоидами в области гексапольного магнита, с точки зрения размагничивания, а также выбора материалов для минимизации этого эффекта. Кроме того, рассматривается влияние выбора материала на срок службы магнитов. Численное моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. Также измерялось магнитное поле гексапольного магнита источника DECRIS-5M. Полученные результаты могут быть использованы как для улучшения характеристик существующих источников ионов, так и для разработки новых ЭЦР-источников.

The purpose of this work is to search for the optimal design and arrangement of magnets to ensure the correct and uniform distribution of the magnetic field in the plasma chamber of the electron cyclotron resonance (ECR) source, using the DECRIS-5M source as an example. We investigate the influence of external magnetic fields created by solenoids in the area of a hexapole magnet from the point of view of demagnetization, as well as the selection of materials to minimize this effect. Also, we consider the influence of the material choice on the service life of magnets. Numerical simulations were carried out using the COMSOL Multiphysics software package. In addition, we have carried out magnetic field measurements of the DECRIS-5M source hexapole magnet. The results obtained can be used to improve the characteristics of existing ion sources and for development of the new sources.

PACS: 07.77.Ka

### ВВЕДЕНИЕ

ЭЦР-источники ионов широко используются в качестве инжектора многозарядных тяжелых ионов для проведения прикладных и фундаментальных исследований. Высокая интенсивность и стабильность ионных пучков обеспечивают непрерывную наработку данных в ходе экспериментов. Улучшение характеристик установок данного типа за последние три десятилетия произошло благодаря расширению знаний в области физики процессов, происходящих в плазме ионного источника, появлению новых технологий и использованию сверхпроводников. Исследования в области

физики и техники ЭЦР-источников ионов проводятся во многих научных центрах США [1], Китая [2], Японии [3], Франции [4], Германии [5], России [6] и др.

Для удержания плазмы в ЭЦР-источнике необходима конфигурация магнитного поля, при которой в центральной области источника создается минимальное поле, так называемый минимум  $B$ . Такая конфигурация обеспечивается суперпозицией осевого магнитного поля, создаваемого соленоидами или кольцами из постоянных магнитов, и радиального магнитного поля, которое задается многополюсным магнитом структуры Хальбаха [7].

В данной работе описываются конфигурация и технологические особенности проектирования многополюсных систем постоянных магнитов на примере ЭЦР-источника DECRIS-5M, создаваемого для ускорительного комплекса DC-140 [8].

### ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА DECRIS-5M

Основным требованием, предъявляемым к источнику ионов ускорительного комплекса DC-140, является возможность получения пучков ионов с атомной массой  $> 132$  с интенсивностью до 1 мкА частиц, включая получение ионов  $\text{Bi}^{38+}$  для тестирования электронных компонентов. В качестве прототипа для создания нового ЭЦР-источника DECRIS-5M был выбран источник, разработанный в ЛЯР для проекта циклотрона DC-110 [9]. Основные параметры источника представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры ЭЦР-источника DECRIS-5M

Параметр	Значение
СВЧ-частота, ГГц	18
Магнитное поле со стороны инжекции, Тл	2,3
Магнитное поле со стороны экстракции, Тл	1,35
Радиальное магнитное поле, Тл	1,3
Внутренний диаметр плазменной камеры, мм	74
Количество катушек	3
Максимальный ток источника питания катушек в области инжекции/экстракции, А	1250
Максимальный ток источника питания катушки в центральной области, А	800
Давление охлаждающей воды, бар	15
Максимальное потребление мощности, кВт	160

В соответствии с требованиями к зарядовому состоянию ионов для создания нужной конфигурации магнитного поля потребовалась модернизация магнитной системы источника, являющегося прототипом. Магнитная система источника модернизирована с целью увеличения осевого магнитного поля в инжекционной части, увеличения радиальной компоненты поля, а также для обеспечения высокой равномерности в распределении радиального магнитного поля вдоль плазменной камеры источника. Конструкция источника ионов DECRIS-5M представлена на рис. 1.

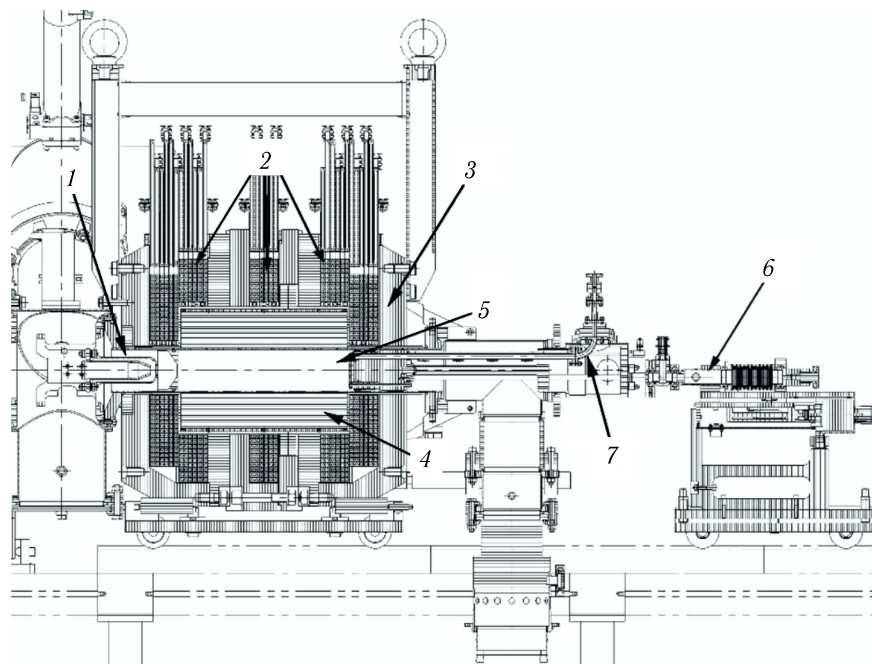


Рис. 1. Поперечный разрез ЭЦР-источника ионов DECRIS-5M: 1 — система экстракции; 2 — катушки; 3 — ярмо из мягкого железа; 4 — гексапольный магнит; 5 — плазменная камера; 6 — устройство ввода твердых веществ; 7 — волновод

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЦР-ИСТОЧНИКА

Необходимая конфигурация магнитного поля обеспечивается пятью соленоидами, гексапольным магнитом, ярмом и полюсом из мягкого магнитного железа для повышения уровня магнитного поля в области инжекции.

Для намотки катушек используется медный проводник  $8 \times 8$  мм с внутренним каналом для подачи охлаждающей воды  $\varnothing 5$  мм, давлением до 15 атм. Расчетное аксиальное распределение магнитного поля показано на рис. 2.

Проектирование мультипольной магнитной системы ЭЦР-источника ионов является комплексной задачей, при решении которой необходимо учитывать требуемые значения индукции магнитного поля не только в области плазменной камеры, но и в области размещения магнитной системы, отвечающей за радиальную компоненту при формировании необходимого распределения магнитного поля. При выборе материала для создания магнита следует учитывать критическое поле размагничивания, которое также называют полем «колена». Этот параметр представляет собой продолжение кривой магнитной индукции в зависимости от магнитной напряженности в области, где материал начинает размагничиваться. Кривая размагничивания является нелинейной, и в точке колена магнитная индукция быстро падает с увеличением магнитной напряженности. Критическое поле размагничивания определяет максимальное магнитное поле, в котором может находиться материал без его полного размагничи-

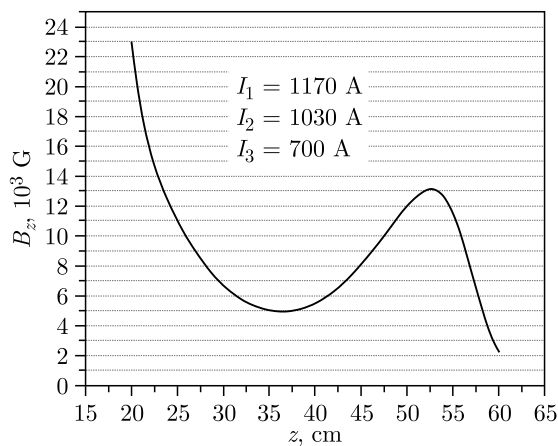


Рис. 2. Аксиальное распределение магнитного поля на оси ЭЦП-источника DECRI5-5M

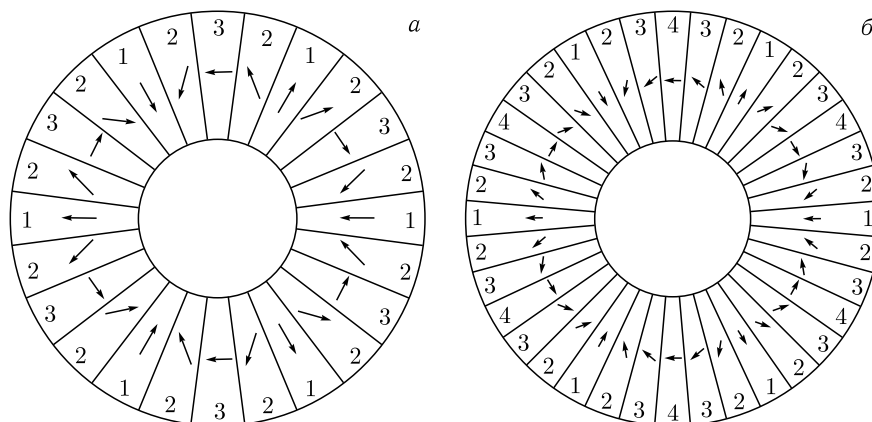


Рис. 3. Конфигурация намагниченности: а) 24 сектора: 1 — полюс ( $0^\circ$ ); 2 — промежуточный сектор ( $45^\circ$ ); 3 — межполюсник ( $90^\circ$ ); б) 36 секторов: 1 — полюс ( $0^\circ$ ); 2 — промежуточный сектор №1 ( $30^\circ$ ); 3 — промежуточный сектор №2 ( $60^\circ$ ); 4 — межполюсник ( $90^\circ$ )

вания. Помимо критического поля размагничивания необходимо учитывать и другие характеристики, такие как магнитная индукция насыщения, коэрцитивная сила и температурная стабильность.

В качестве первоначального расчета проведено сравнение системы Хальбаха, включающей в себя 24 и 36 секторов. Конфигурация магнитных систем представлена на рис. 3. Для расчета магнитов выбран материал N48SH, так как он полностью удовлетворяет начальным условиям задачи и обеспечивает необходимый уровень магнитного поля в области стенки камеры ЭЦП-источника. Все численные расчеты проведены с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics [10].

Согласно расчетам использование 36-секторной системы повышает величину магнитного поля на 0,7%, что эквивалентно значению 1000 Гс (рис. 4) и значительно

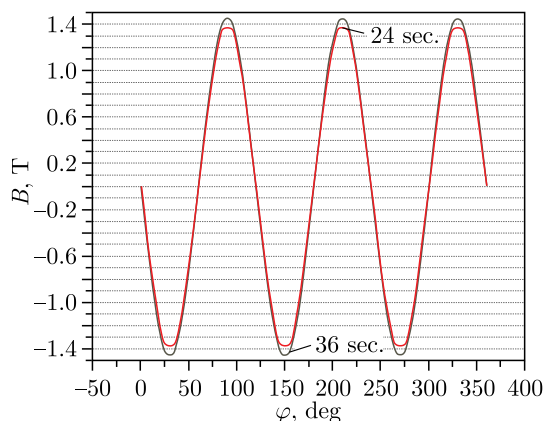


Рис. 4. Азимутальное распределение радиального магнитного поля в центральной области плазменной камеры ЭЦР-источника на  $R = 37$  мм для 36- и 24-секторного гексаполя

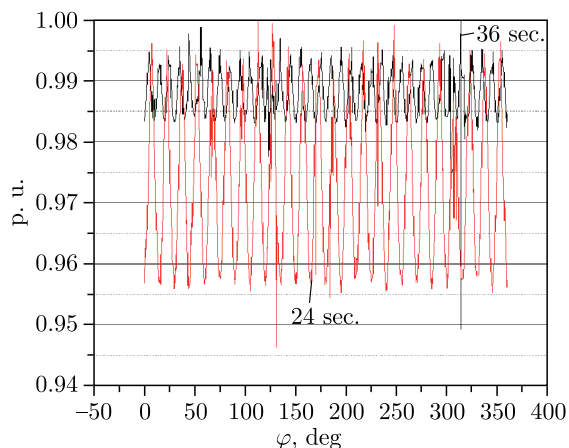


Рис. 5. Модуль магнитного поля, нормализованный на единицу для 36- и 24-секторного гексаполя в области плазменной камеры ЭЦР-источника на  $R = 37$  мм

снижает неравномерности  $|B|$  в расчетной области на несколько процентов (рис. 5). Однако магнитная система с повышенным количеством секторов значительно сложнее в изготовлении, что приводит к увеличению цены изделия. Помимо этого в процессе сборки возможно образование сколов и смещений полюсов друг относительно друга, что наоборот повысит неравномерности распределения магнитных полей в области камеры ЭЦР-источника.

Для минимизации технологических рисков и оптимизации цены изделия выбрана 24-секторная конфигурация мультиполюсного магнита со структурой Хальбаха, внешний диаметр которого 210 мм, внутренний диаметр 80 мм и длина 300 мм.

Следующим шагом является оценка неравномерностей магнитного поля, возникающих в процессе склейки секторов мультиполюсного магнита. Для определения влияния межсекторного расстояния, которое образуется в процессе склейки частей

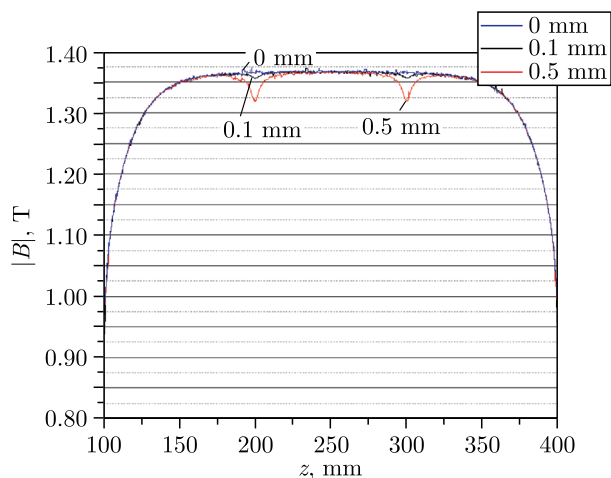


Рис. 6. Продольное распределение радиальной компоненты магнитного поля гексаполя на  $R = 37$  мм с учетом поперечных склеек полюсов и межполюсников

гексаполя, на распределение магнитного поля проведен оценочный расчет, в котором гексаполь разделен на 3 равные части, при этом расстояние между частями магнитов варьируется от 0,1 до 0,5 мм. В качестве материала магнита, используемого для расчета, также выбран материал N48SH. Расчетные результаты представлены на рис. 6.

Расчет показывает увеличение спада радиального поля в области стенок плазменной камеры в зависимости от толщины эпоксидного слоя при склейке магнитов. Спад радиального поля в области склеек (см. рис. 6) при толщине слоя 0,1 мм составляет 0,6% относительно цельной трапециевидальной структуры. При увеличении толщины до 0,5 мм спад составляет 3,3%.

При проектировании гексапольного магнита для источника DECRIS-5M учитывались значения радиального размагничивающего поля, создаваемого соленоидами. Суммарное размагничивающее поле является существенно неоднородным. Это означает, что на каждый сектор гексапольного магнита помимо внешних магнитных полей действует и свое размагничивающее поле. При этом в симметричных секторах собственное размагничивающее поле можно полагать приблизительно одинаковым. Однако внешнее размагничивающее поле меняется в зависимости от расположения секторов гексапольного магнита.

Расчетное распределение внешнего радиального магнитного поля, создаваемое соленоидами в области размещения гексапольного магнита, представлено на рис. 7.

Так как собственное размагничивающее поле в объеме полюсных участков гексаполя не может превосходить половины остаточной намагниченности (1,3 Тл), а максимальное размагничивающее поле, создаваемое соленоидальными магнитами в области размещения гексаполя, соответствует значению 8,5 кЭ, то суммарное размагничивающее поле  $H_{\text{пол}}$  в области полюсов эквивалентно значению 15 кЭ. В объеме межполюсных участков поле направлено перпендикулярно сечению магнитной системы. Это означает, что поле внешних источников направлено перпендикулярно магнитной текстуре гексаполя и не оказывает существенного размагничивающего действия вдоль

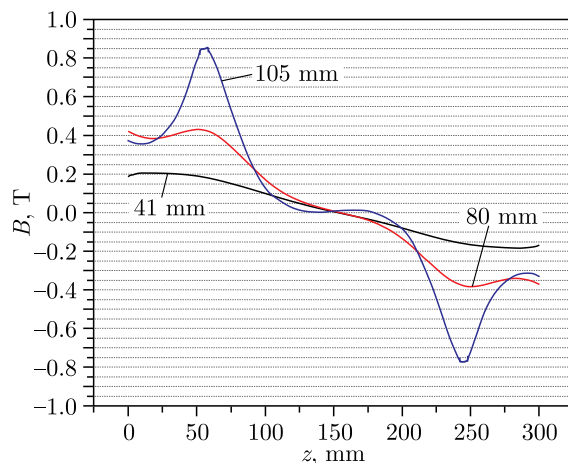


Рис. 7. Радиальная компонента магнитного поля, создаваемая соленоидами источника DECRIS-5M на различных радиусах в области размещения гексаполя

осей намагничивания. Таким образом, в качестве максимального размагничивающего поля выбрана величина 15 кЭ.

Внешнее магнитное поле, создаваемое соленоидами, не предъявляет жестких требований к выбору материала по размагничиванию, однако использование таких материалов, как N50H ( $B_r = 1,42$  Тл), N55 ( $B_r = 1,49$  Тл), N52 ( $B_r = 1,45$  Тл) или же N50 ( $B_r = 1,42$  Тл), осложняет задачу, так как данные материалы имеют достаточно высокие параметры по остаточной намагниченности, но при этом низкую коэрцитивную силу. При создании магнитной структуры с использованием таких материалов необходимо обеспечить расположение данных материалов в области пониженного внешнего магнитного поля, как это сделано в работе [11].

Для реализации поставленной задачи радиальное магнитное поле в области внутреннего диаметра плазменной камеры, создаваемое гексаполюсным магнитом, должно соответствовать значению 1,3 Тл, с погрешностью не более  $\pm 3\%$ . Выборка из подходящих материалов для изготовления мультиполюсного магнита представлена в табл. 2. Не все из выбранных материалов позволяют обеспечить требуемую величину маг-

Таблица 2. Характеристики материалов из NdFeB [12], рассматриваемых для изготовления магнитной структуры

Материал	$B_{r \text{ min}}$ , Тл	$B_{r \text{ nominal}}$ , Тл	$B_{r \text{ max}}$ , Тл	$H_{CB}$ , кЭ	$H_{Cj}$ , кЭ	$BH_{\text{max}}$ , МГс·Э
N33SH	1,13	1,175	1,22	10,6	20	34
N35SH	1,17	1,21	1,25	11,0	20	35
N38SH	1,22	1,26	1,30	11,4	20	39
N40SH	1,25	1,27	1,29	11,8	20	40
N42SH	1,28	1,31	1,34	12,0	20	41
N45SH	1,32	1,35	1,38	12,3	20	44
N48SH	1,36	1,39	1,42	12,5	19	47

нитного поля в расчетной области, однако комбинации данных магнитов позволяют к нему приблизиться.

Расположение материалов в расчете согласно рис. 3 для 24-секторного гексаполя подразумевает использование материалов с большей намагниченностью для сектора 1 и 3 и с меньшей остаточной намагниченностью для сектора 2, что обусловлено меньшим влиянием на итоговое распределение магнитного поля в расчетной области за счет сектора с намагниченностью  $45^\circ$ , а также снижением результирующего магнитного поля  $|B|$  в расчетной области на несколько процентов при использовании одинаковых по остаточной намагниченности материалов для сектора 2 и 3.

Таким образом, для оценочного расчета используются следующие материалы: для секторов 1 и 3 — N40SH, N42SH, N45SH, N48SH, для сектора 2 — N33SH, N35SH и N38SH. Результаты расчета с материалами, наиболее подходящими по величине магнитного поля, представлены на рис. 8.

Согласно полученным результатам наиболее подходящей комбинацией магнитов, при которой достигается максимальный уровень радиального магнитного поля, является следующая комбинация:

- сектор № 1 (полюс) составной по длине и высоте:  
100 + 100 + 100 мм — наружная часть, высота сектора 50, используемый материал — N48SH;  
75 + 150 + 75 мм — внутренняя часть, высота сектора 15, используемый материал — 50SH;
- сектор № 2 составной по длине:  
100 + 100 + 100 мм, используемый материал — N38SH;
- сектор № 3 составной по длине:  
100 + 100 + 100 мм, используемый материал — N48SH.

Поперечное разделение полюсных участков системы обусловлено не только необходимостью компенсации размагничивающих аксиальных полей, создаваемых соле-

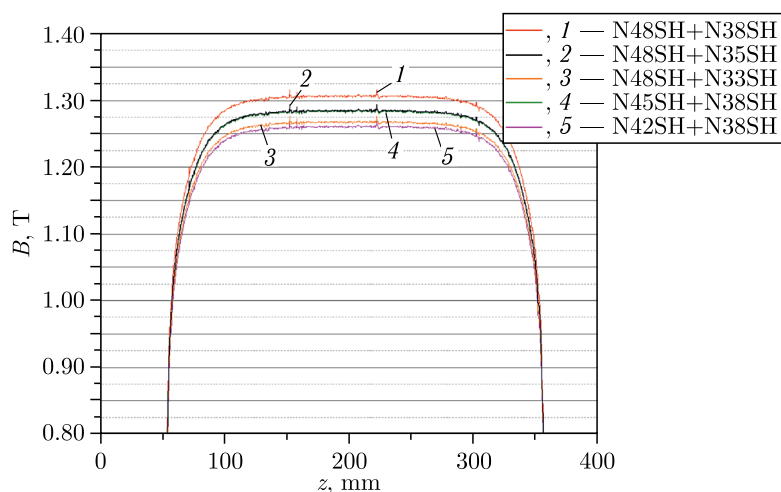


Рис. 8. Осевое распределение радиального магнитного поля гексаполя в области камеры ЭЦР-источника при использовании различных материалов на радиусе 37 мм



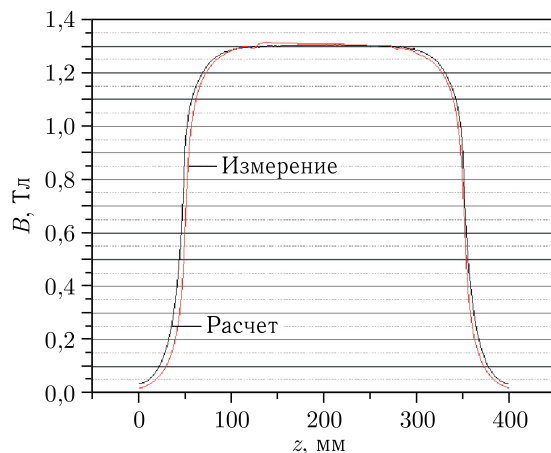


Рис. 9. Осевое распределение радиального магнитного поля гексаполя ЭЦР-источника ионов DECRIS-5M на радиусе 37 мм

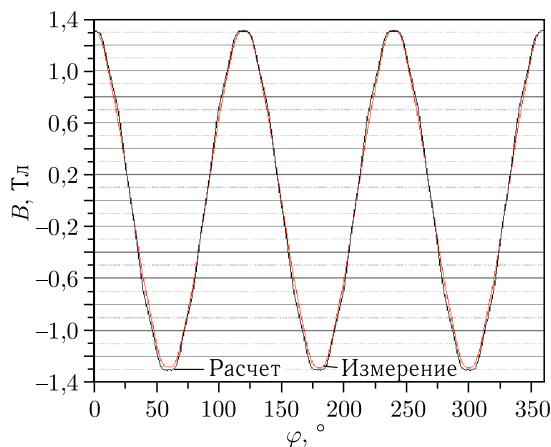


Рис. 10. Азимутальное распределение радиального магнитного поля гексаполя ЭЦР-источника ионов DECRIS-5M на радиусе 37 мм

ноидами, но и созданием высокого уровня магнитного поля за счет использования материала с высоким значением остаточной намагниченности.

Расстояние между частями сектора в процессе продольной/поперечной склейки не превышает 0,1 мм, что позволяет обеспечить минимальные неравномерности по величине магнитного поля ( $< 1\%$ ). Максимальное отклонение расчетных результатов от измерений составляет 2% (рис. 9, 10).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет магнитной структуры ЭЦР-источника DECRIS-5M для нового ускорительного комплекса DC-140 с учетом влияния внешних магнитных полей, создаваемых соленоидальными катушками, а также оценкой технологических особенно-

стей изготовления магнитов, влияющих на итоговое распределение магнитных полей в расчетной области. По результатам расчетов спроектирован и изготовлен гексапольный магнит, обеспечивающий уровень радиального магнитного поля  $B = 1,3$  Тл в области камеры ЭЦР-источника. Разброс значений магнитного поля для полюсов (см. рис. 10) не превышает 3%. Максимальное отклонение расчетного и измеренного магнитного поля на радиусе 37 мм составило 2%.

**Благодарности.** Авторы выражают свою признательность А. В. Белову, Е. В. Супрякову и Н. И. Клевцу за ценные советы и замечания при проведении исследования, описанного в данной работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leitner D.* High Performance ECR Sources for Next-Generation Nuclear Science Facilities // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2019), Melbourne, Australia, May 14–24, 2019. JACoW Publ., 2019. P. 2224–2229.
2. *Zhao H. W., Sun L. T., Zhang X. Z., Guo X. H., Cao Y., Lu W., Zhang Z. M., Yuan P., Song M. T., Zhao H. Y., Jin T., Shang Y., Zhan W. L., Wei B. W., Xie D. Z.* Intense Beam Production of Highly Charged Heavy Ions by the Superconducting Electron Cyclotron Resonance Ion Source SECRA // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79, No. 2. P. 02A315.
3. *Higurashi Y., Ohnishi J., Ozeki K., Kidera M., Nakagawa T.* Recent Development of RIKEN 28 GHz Superconducting Electron Cyclotron Resonance Ion Source // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, No. 2. P. 02A953.
4. *Maunoury L., Dubois M., Damoy S.* Charge Breeder of Electron Cyclotron Resonance Type: A New Application to Produce Intense Metal Ion Beams for Accelerators // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1040. P. 167136.
5. *Andreev A., Maimone F., M'ader J., Lang R., Patchakui P. T., Tinschert K., Hollinger R.* Magnet System Design for the New 18 GHz ECR Ion Source at GSI // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2244. P. 012102.
6. *Mironov V., Bogomolov S., Bondarchenko A., Efremov A., Loginov V.* Numerical Model of Electron Cyclotron Resonance Ion Source // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2015. V. 18, No. 12. P. 123401.
7. *Halbach K.* Strong Rare Earth Cobalt Quadrupoles // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. 26, No. 3. P. 3882–3884.
8. *Pugachev D., Bogomolov S., Bondarchenko A., Efremov A., Kuzmenkov K., Lebedev A., Loginov V., Mironov V., Yazvitsky N.* Development of a New 18 GHz ECR Type Ion Source for the DC-140 Cyclotron Complex // Proc. of the 25th Intern. Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS-2022), Gandhinagar, Gujarat, India, Oct. 12–14, 2022.
9. *Gikal B. N., Dmitriev S. N., Gul'bekyan G. G. et al.* Development, Creation, and Startup of the DC-110 Heavy Ion Cyclotron Complex for Industrial Production of Track Membranes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11. P. 137–150.
10. <https://www.comsol.ru>
11. *Oh B. H., Seo C. S., In S. R., Kim T. S.* Fabrication of an Optimized Hexapole Magnet for a 14.5 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81, No. 2. P. 02A317.
12. <https://www.arnoldmagnetics.com>