

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА**

УДК 538.945:621.384.66

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАГНИТЫ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ<sup>1</sup>**

**©2024 г. Е. Р. Запретилина<sup>а</sup>, Ю. А. Климченко<sup>а,\*</sup>, О. А. Ковальчук<sup>а</sup>,  
А. Н. Лабусов<sup>а</sup>, Е. А. Ламзин<sup>а</sup>, И. Ю. Родин<sup>а</sup>, В. Н. Танчук<sup>а</sup>,  
Н. А. Хитров<sup>а</sup>, Т. А. Хон<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт*

*электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова*

*Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3*

*\*e-mail: [klimchua@sintez.niiefa.spb.su](mailto:klimchua@sintez.niiefa.spb.su)*

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 13.06.2024 г.

Статья посвящена разработке специалистами АО “НИИЭФА” сверхпроводниковых магнитов, применяемых в системах инжекции (источники ионов) различного типа. Представлены два сверхпроводниковых магнита различной конфигурации, применяемых в сильноточном инжекторе многозарядных ионов на базе сверхпроводникового источника ионов с электронно-циклотронным резонансом с индукцией магнитного поля на оси со стороны инжекции 4 Тл, со стороны экстракции пучка ионов 2–2.5 Тл, а также в электронно-лучевом источнике многозарядных ионов системы внешней инжекции циклотронного комплекса с индукцией магнитного поля 5 Тл. Приведены обоснование выбора основных параметров магнитной системы и ее защиты, а также электромагнитный, тепловой и механический анализ выбранной конфигурации магнитной системы.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ускорительные установки различной конфигурации находят большое применение в сферах медицинской и научной деятельности. Одним из основных направлений работ по развитию ускорительной техники является увеличение энергии пучков заряженных частиц, что достигается совершенствованием магнитной системы ускорителя и системы инжекции.

В данный момент в АО “НИИЭФА” ведутся работы по созданию двух сверхпроводниковых магнитов для источников ионов.

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

Первый магнит – это сверхпроводниковая магнитная система на базе сверхпроводникового источника ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР), входящая в комплекс работ по созданию “Фабрики сверхтяжелых элементов” для синтеза сверхтяжелых элементов. Одним из элементов разрабатываемой установки является сильноточный инжектор многозарядных ионов на базе сверхпроводникового ЭЦР-источника с частотой 28 ГГц.

Второй магнит – это сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл, являющаяся составной частью электронно-лучевого источника многозарядных ионов, который использует магнитно-сжатый квазимоноэнергетический пучок электронов с энергией до 20 кэВ и плотностью тока до 1000 А/см<sup>2</sup> и более для последовательной ионизации ионов с низкой зарядностью, инжектируемых в электронный пучок. Магнитное поле для сжатия электронного пучка генерируется специальной сверхпроводниковой магнитной системой, состоящей из незранированного секционного сверхпроводящего соленоида.

## 2. СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЭЦР-ИСТОЧНИКА НА ЧАСТОТЕ 28 ГГц

Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника предназначена для формирования конфигурации магнитного поля, типичной для магнитной ловушки, способной удерживать заряженные частицы плазмы в рабочем объеме. Заданная частота (28 ГГц) определяет ряд основных параметров, в том числе требования к уровню и распределению магнитного поля в рабочей области источника.

Конструктивно ЭЦР-источник состоит из криостата с “теплым” отверстием, гелиевой ванны, системы криогенного обеспечения, теплового экрана, блока реконденсации жидкого гелия и сверхпроводниковой магнитной системы (рис.1).

**Рис. 1.** ЭЦР- источник на частоте 28 ГГц.

В рамках данной работы разработана концептуальная модель криостата, система поддержки холодных масс и система криогенного обеспечения. ЭЦР-источник включает в себя комплекс оборудования: систему питания и управления сверхпроводниковой магнитной системы, систему вакуумной откачки, систему термометрии и систему защиты обмоток сверхпроводниковой магнитной системы.

На основе требований к параметрам магнитной системы ЭЦР-источника выполнены расчетно-конструкторские работы по выбору и обоснованию рабочего варианта магнитной системы [1]. Магнитное поле создается продольными и поперечными катушками.

Конструктивно система продольного поля состоит из набора соленоидальных катушек, создающих поле с конфигурацией, отвечающей полю прямой зеркальной ловушки.

Система поперечного поля в подобных источниках имеет шесть рейтрековых катушек, расположенных на цилиндрической поверхности, с чередующейся полярностью питания для создания гексапольного поля.

Катушками по отношению друг к другу можно разместить в двух вариантах [2]. Первый вариант (рис. 2а), традиционный, в котором гексаполь располагается внутри соленоидов. Конструктивной особенностью является использование элементов, выполненных из магнитомягкой стали, которая в условиях работы источника находится в состоянии технического насыщения. К этим элементам относятся полюса катушек гексаполя и магнитопровод (бустер), охватывающий снаружи все катушки. Наличие этих элементов снижает критический ток и поле в катушках на 20% и 5% соответственно, что удовлетворяет рекомендованным значениям этих величин для сверхпроводниковых обмоток на основе NbTi-сплава.

Во втором варианте (рис 2б), реверсном, обращенном, сверхпроводниковые соленоиды находятся внутри рейтрековых катушек.

**Рис. 2.** Расположение обмоток сверхпроводниковой магнитной системы: **а** – традиционный вариант, **б** – обращенный вариант.

В данном варианте рабочие параметры сверхпроводника находятся в области критических значений, что снижает надежность работы такой системы.

Как результат, за основу принят традиционный вариант конструктивного исполнения магнитной системы с расположением соленоидов на внешнем диаметре гексаполя.

Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника ионов (рис. 3) представляет из себя магнитную систему, находящуюся внутри ферромагнитного бустера. Ферромагнитный бустер, согласно электромагнитному расчету, предназначен для замыкания магнитного потока, что способствует снижению рабочего тока и магнитного поля в обмотках соленоидов и гексаполя до допустимых рабочих значений.

**Рис. 3.** Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника ионов.

На основе требований к параметрам магнитной системы ЭЦР-источника выполнены расчетно-конструкторские работы по выбору и обоснованию рабочего варианта магнитной системы. Основные параметры отражены в табл. 1. Как видно, уровень магнитного поля на продольной оси источника со стороны инжекции нейтральных атомов достигает 4 Тл. Такой уровень поля обеспечивается использованием сверхпроводниковых материалов на основе NbTi.

**Таблица 1.** Основные параметры магнитной системы ЭЦР-источника  
на частоте 28 ГГц

Диаметр “теплого” отверстия, мм	142
Внутренний радиус вакуумной камеры, мм	62
Расстояние между максимумами поля ( $B_{inj}$ и $B_{extr}$ ) на оси, мм	420
Продольное поле $B_{inj}$ на оси со стороны инжекции, Тл	4
Продольное поле $B_{extr}$ на оси со стороны экстракции пучка ионов, Тл	2–2.5
Минимум $B_{min}$ продольного поля на оси, Тл	0.5–0.8
Модуль поля $ B $ на радиусе $R = 62$ мм не меньше, Тл	2.02

С целью выбора размеров магнитной системы были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния источника под действием расчетных электромагнитных нагрузок с учетом захлаживания до 4К. Основная проблема – сложный характер распределения электромагнитных и механических нагрузок: предварительная затяжка болтов/шпилек, термическое расширение/сжатие, электромагнитные силы.

В результате оптимизации размеров магнитной системы было получено, что предпочтительными являются:

- длина линейных участков гексаполей (рейстреков) – 810 мм;
- увеличение третьего соленоида в осевом направлении;
- увеличенная предварительная затяжка шпилек;
- увеличенные размеры поджимного и приварного колец;
- материалы поджимного и приварного колец – алюминиевый сплав Д16Т;
- тепловая посадка поджимного и приварного колец не требуется.

Интенсивность напряжений в лобовых участках рейстрека под действием всех нагрузок (предзатяг болтов/шпилек, захлаживания, электромагнитные силы) на 3% меньше допустимого значения.

### 3. СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ПОЛЕМ ИНДУКЦИИ 5 ТЛ

Сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл является составной частью электронного-лучевого источника многозарядных ионов и представляет собой комплекс оборудованию, включающий в себя сверхпроводящий соленоид специальной конструкции, криостат, систему криогенного обеспечения, систему вакуумной откачки, систему мониторинга основных рабочих параметров соленоида: температура, давление,

рабочий ток, а также систему электропитания, управления и защиты. Модель СМС представлена на рис. 4.

**Рис. 4.** Сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл.

Сверхпроводниковая магнитная система удовлетворяет следующим требованиям:

- специальная конструкция соленоида, оптимизированная для работы без жидких хладагентов длиной 1020 мм;
- диаметр “теплого” отверстия 165 мм;
- ориентация поля горизонтальная;
- величина поля в центре соленоида – 5 Тл (при 4.2 К на обмотке соленоида);
- рабочий ток системы составляет порядка 139 А;
- однородность поля  $\pm 0.16\%$  на расстоянии  $\pm 300$  мм от центра соленоида (вдоль оси) и  $\pm 0.7\%$  на расстоянии от 300 мм до 350 мм от центра соленоида (вдоль оси);
- имеет систему защиту от перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние.

Соленоид намотан из сверхпроводника на основе эмалированного NbTi последовательно соединенными секциями.

Центральная секция (длиной 814 мм) состоит из 26 слоев проводника. Для повышения однородности поля, с каждого конца соленоида наматывается по секции сверхпроводящего провода (рис. 5) длиной 72 мм из 56 слоев по 80 мм.

**Рис. 5.** Обмотки сверхпроводящего соленоида

Расчет напряженно-деформированного состояния и оценка прочности соленоида с полем индукции 5 Тл показали следующее:

- величины напряжений, возникающих в силовых элементах конструкции, выполненных из бескислородной меди, при эксплуатационных нагрузках не превышают допустимых;
- при захолаживании (4К) величина радиального зазора между сверхпроводящими обмотками и медной бобиной составляет 2мкм. Наличие данного зазора не осложнит пассивное охлаждение обмотки теплопроводностью, вследствие чего нет необходимости предусматривать радиальное обжатие обмотки с целью устранения зазора в рабочем режиме;
- величины напряжений в Cu/NbTi-сверхпроводнике при совместном действии равномерного температурного поля 4К и электромагнитных сил не превышают допустимых.

Для данной магнитной системы были спроектированы система криогенного обеспечения, криостат с “сухой” системой охлаждения, система вакуумной откачки, системы электропитания, управления и защиты.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены основные этапы по созданию сверхпроводниковых магнитов источников ионов, выбраны конфигурации магнитных систем, проведены расчеты, подтверждающие надежность конструкций, разработаны криостаты и системы криогенного обеспечения, выбраны компоненты систем диагностики, защиты сверхпроводящих обмоток, управления и питания. Проработаны режимы захлаживания, стационарные режимы и режимы отогрева сверхпроводниковой магнитной системы.

В настоящий момент магнитные системы находятся на стадии изготовления и сборки. Следующим этапом будут приемо-сдаточные испытания изделий с последующей передачей заказчику.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосков М., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионов Е.И., Гаркуша Д.Б., Глухих М.И., Кухтин В., Ламзин Е.А., Максименкова Н.А., Мингалев Б.С., Сычевский С.Е., Филатов О.Г.// Официальный бюллетень российского агентства по патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС, 2004. Т.1(46). С. 57.

2. Выбор системы криогенного обеспечения и анализ напряженно-деформированного состояния конструкции для реверсного варианта магнитной системы. Технический отчет. Предварительный электромагнитный анализ сверхпроводящей магнитной системы ЭЦР-источника ионов на частоте 28 ГГц в “обращенном” исполнении.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

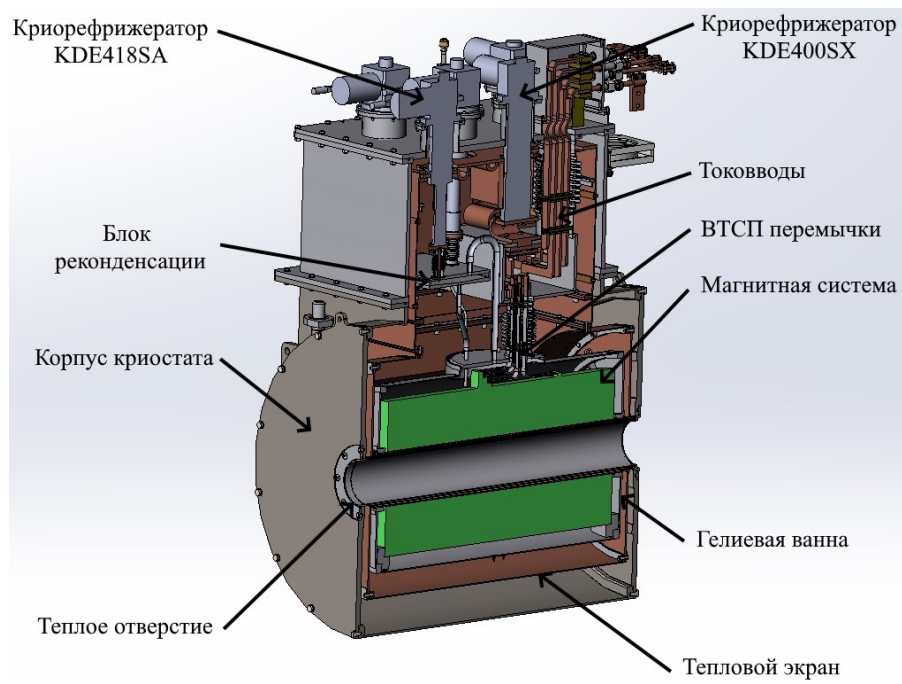
**Рис. 1.** ЭЦР-источник на частоте 28 ГГц.

**Рис. 2.** Расположение обмоток сверхпроводниковой магнитной системы: **а** – традиционный вариант, **б** – обращенный вариант.

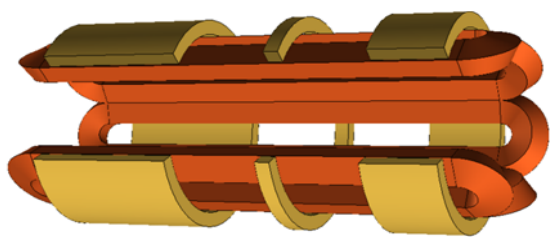
**Рис. 3.** Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника ионов.

**Рис. 4.** Сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл.

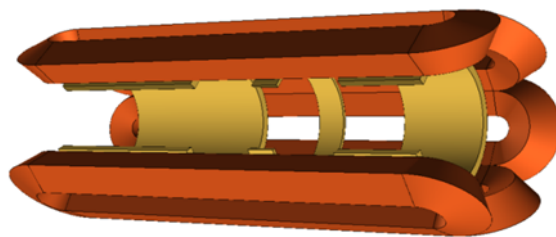
**Рис. 5.** Обмотки сверхпроводящего соленоида.



**Рис. 1.**



(a)



(б)

Рис. 2.

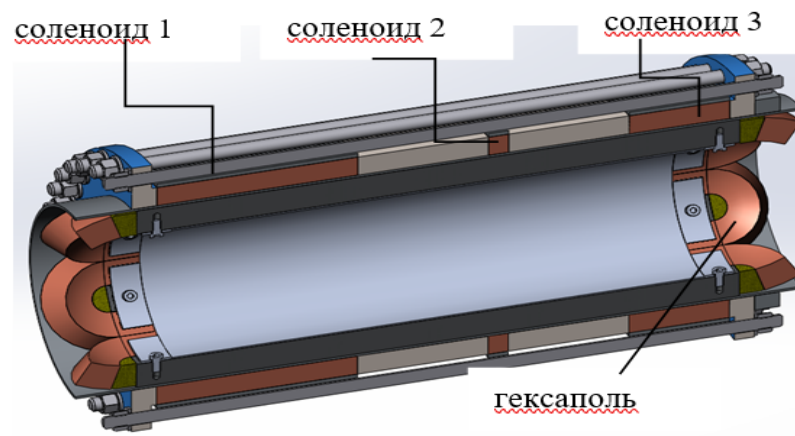
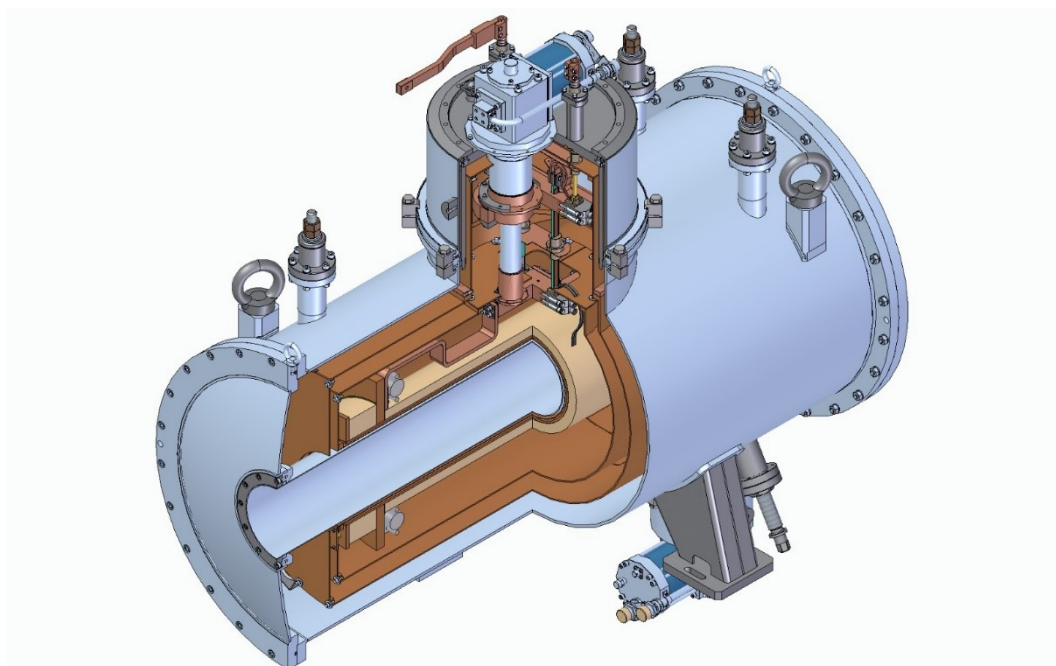
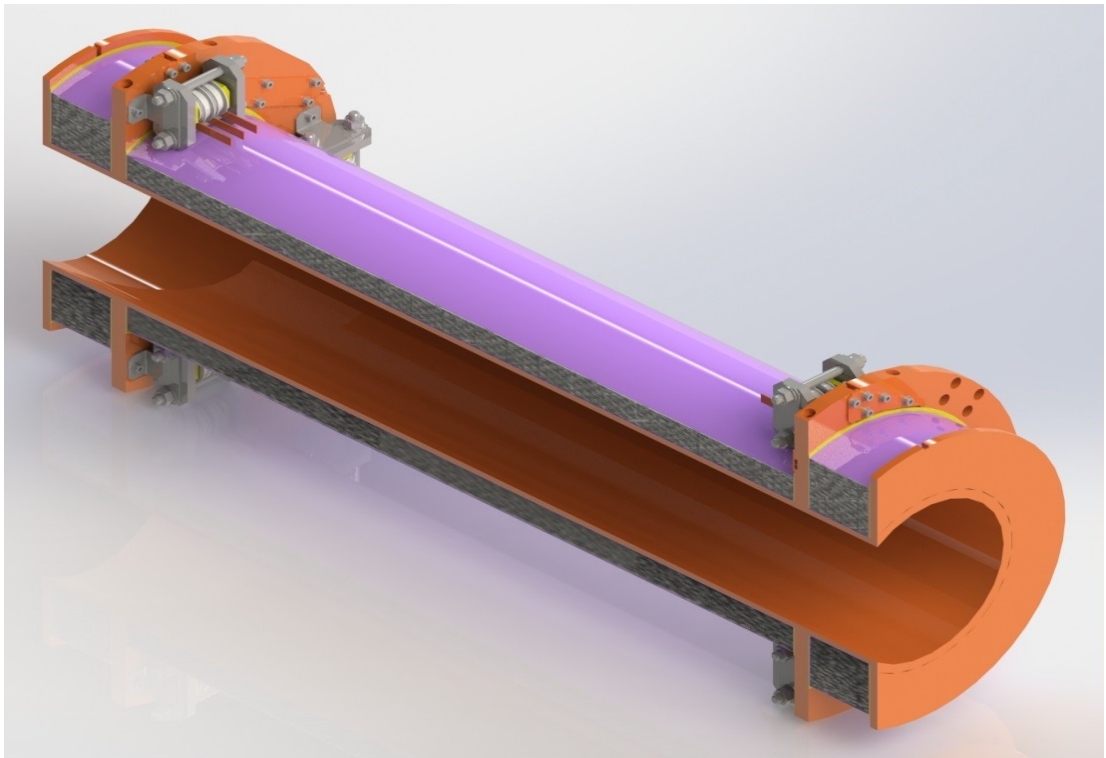


Рис. 3.



**Рис. 4.**



**Рис. 5.**

**Для связи с авторами:**

**Климченко Юрий Алексеевич**  
**Е-mail: [klimchua@sintez.niiefa.spb.su](mailto:klimchua@sintez.niiefa.spb.su)**  
**Тел.: 8-921-745-01-77 (моб.)**

**Для переводчика:**

**Superconducting magnets of ion sources**

Today, accelerator installations of various configurations are widely used in the fields of medical and scientific activities. One of the main directions of work on the development of accelerator technology is to increase the energy of beams of charged particles, which is achieved by improving the magnetic system of the accelerator and the injection system. This article is devoted to the development by specialists of JSC NIIEFA of superconducting magnets used in injection systems (ion sources) of various types. The article presents two superconducting magnets of different configurations, used: in a high-current injector of multiply charged ions based on an ECR (electron cyclotron resonance) type superconducting ion source with a magnetic field induction on the axis on the injection side of 4 T, on the extraction side of the ion beam 2-2, 5 T, and in the electron beam source of multiply charged ions of the external injection system of the cyclotron complex with a magnetic field induction of 5 T, respectively. The article provides: justification for the choice of the main parameters of the magnetic system and its protection, electromagnetic, thermal and mechanical analysis of the selected configuration of the magnetic system.