

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «ПАМЕЛА»**

В рамках выполнения межправительственной российско-итальянской программы «РИМ» специалисты НПП ВНИИЭМ вот уже несколько лет ведут совместно с представителями итальянского Института Ядерной физики (INEN) работы по созданию прибора «Памела». Этот прибор предназначен для измерения энергетических спектров антипротонов, позитронов, электронов, изотопов легких и средних ядер в околоземном космическом пространстве. Прибор «Памела» включает в себя пять детекторных систем, в одной из которых имеется магнитная система с микроstriповым трекером, разработанным и проверенным на функциональную надежность и качество в ходе выполнения программы «Nina».

Магнитная система (МС) с встроенным трекером позволяет проводить измерения жесткости (импульс, отнесенный к единице заряда) заряженной частицы, двигающейся в магнитном поле, а также определить знак и величину заряда частицы.

Для выполнения этих функций предстояло разработать такую МС, которая бы удовлетворяла следующим требованиям:

- иметь максимально возможную и необходимую для регистрации частиц величину индукции  $B_0$  в рабочей зоне прибора (в зоне расположения микроstriпового трекера);
- размеры эффективного сечения рабочей зоны, в которой выдерживается заданное значение  $B_0$ , должны иметь максимально возможную величину;
- позволять оптимизировать соотношения длины, величины магнитной индукции  $B_0$  и массы;
- обеспечивать необходимый уровень однородности магнитного поля в рабочей зоне;
- обеспечивать стабильность величины магнитного поля при изменении температуры МС в условиях полета;
- обеспечивать минимальную величину рассеяния магнитного

поля в окружающем МС пространстве с целью выполнения условий электромагнитной совместимости с функциональным или другим научным оборудованием, размещенном на борту КА.

Известные способы возбуждения однородного магнитного поля используют традиционные соленоиды, сверхпроводниковые магнитные системы или постоянные магниты. Постоянные магниты при использовании их в условиях КА имеют определенные преимущества перед другими магнитными системами: они не требуют источников питания и системы охлаждения, это существенно упрощает задачу снижения массогабаритных показателей, что крайне важно для размещения МС на КА.

Для выполнения вышеуказанных требований очень важно определить из каких материалов будут изготовлены магниты МС космического прибора. Создание МС на базе постоянных магнитов было в итоге возложено на НПП ВНИИЭМ.

В таблице приведены основные магнитные параметры отечественных высокоэнергетических постоянных магнитов, получаемых из сплавов редкоземельных элементов: сплав ниодим-железо-бор (Nd-Fe-B) и сплав самарий-кобальт (Sm-Co), которые производятся на нашем предприятии.

Сплав	$B_r$ , Тл	$H_{св}$ , кА/м	$H_{сМ}$ , кА/м	$(B \cdot H)_{\max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\alpha B_r$ , %/К	$\beta H_{сМ}$ , %/К	$T_{\max}$ , °С
Сплав, содержащий 28%Nd, 4%B	1,2	850	1200	260	-0,1	-0,6	70
Сплав, содержащий 32%Nd, 4%B	1,1	800	1450	230	-0,1	-0,6	130
Сплав, содержащий 25%Nd, 8%B	1,0÷1,05	770	1800	210	-0,1	-0,6	140
КС37 (37%Sm)	0,85÷0,95	600÷720	1200	140÷170	-0,04	-0,03	250
КС25 (25% Sm)	1,0÷1,15	600÷900	1200	190÷240	-0,03	-0,03	300

Представленные в таблице обобщенные параметры композитных магнитных сплавов характеризуют спектр материалов, из которых представляется возможность создать высокоэнергетическую магнитную систему для космического телескопа.

Как результат оптимизационного расчета было принято решение использовать для построения МС космического телескопа постоянные магниты на основе композита Nd-Fe-B с величиной остаточной магнитной индукции  $B_r = 1,2$  Тл. Эти магниты имеют на (13÷15)% плотность меньше, чем Sm-Co, что немаловажно с точки зрения массогабаритных показателей и, кроме того, они по стоимости примерно в 2 раза дешевле Sm-Co. Разработка конструктивного решения МС телескопа потребовала системного анализа методов получения однородного магнитного поля с высокой величиной магнитной индукции в рабочей зоне. Был успешно использован научный потенциал, накопленный в процессе создания магнитной системы медицинского диагностического томографа ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Эти работы велись в НПП ВНИИЭМ в рамках Государственной программы ГКНТ по теме «Томограф» совместно с Институтом атомной энергии им. И.В. Курчатова.

Анализ показывает, что возможно создание МС цилиндрической формы, МС в виде многогранника, МС прямоугольной формы [1-4].

Наиболее подходящей для космического телескопа оказалась конструкция МС прямоугольной формы. Путем выбора формы, размеров и угла вектора намагничивания отдельных блоков, изготовленных из элементарных магнитов, удастся добиться относительно равномерного распределения магнитного потока по всей рабочей зоне МС. Такая система удобна также с точки зрения компоновки телескопа в условиях КА и обеспечивает минимальные поля рассеяния для обеспечения требований электромагнитной совместимости.

Из опыта построения МС ЯМР томографа с очень высоким уровнем однородности магнитного поля (не ниже  $10^{-6}$ ) разработчикам было ясно, что для создания однородного поля во всем рабочем объеме МС телескопа следует применить селективный отбор элементарных магнитов по величине остаточной индукции  $B_r$  и  $H_{cm}$ , установив допустимую величину разброса, но при этом оптимизировать процесс отбора так, чтобы не слишком удорожить МС в целом<sup>1</sup>.

Определение оптимальных размеров проводилось методом координатного поиска на основе расчета магнитного поля. Для

---

<sup>1</sup> Работы по созданию математической модели МС и разработка программы достижения оптимальных геометрических размеров МС выполнены канд. техн. наук П.А.Матвейчуком.

предварительных поисковых расчетов магнитного поля использовался метод конечных элементов, так как он обладает большой геометрической гибкостью и требует малого времени для проведения этих расчетов. Исследуемая область описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{M} \frac{dA}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{M} \frac{dA}{dy} \right) = -J$$

с граничными условиями Дирихле  $A_n = 0$ .

Рассматриваемая двухмерная расчетная модель приведена на рис.1.

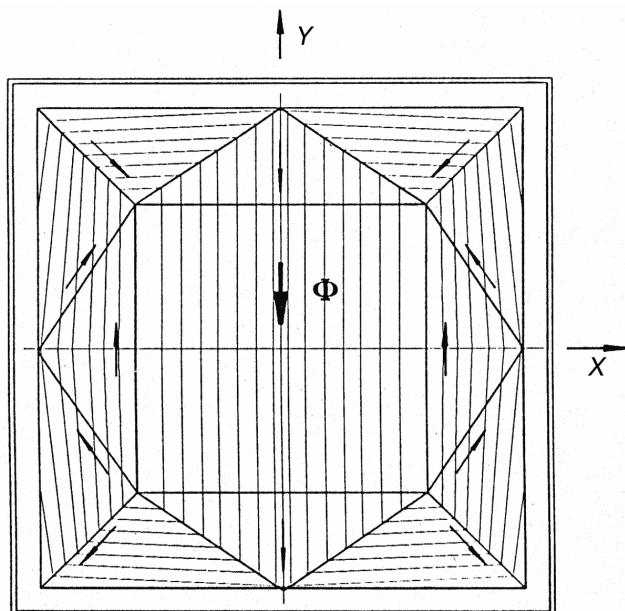


Рис. 1. Расчетная модель магнитной системы

Окончательные расчеты проведены с использованием пакета программ для расчета трехмерного поля. В основе расчета трехмерного магнитного поля лежит метод интегральных уравнений [5]. Магнитное поле  $\vec{H}_{(p)}$  в точке  $p$  исследуемой области определяется как сумма:

$$\vec{H}_{(p)} = \vec{H}_{j(p)} + \vec{H}_{m(p)},$$

где  $\vec{H}_{j(p)}$  - поле токов в свободном пространстве:

$$\bar{H}_{j(p)} = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{[\bar{J} \times \bar{r}_{QP}]}{\bar{r}_{QP}^3} J dV;$$

$\bar{J}$  – плотность тока;  $\bar{r}_{QP}$  - радиус-вектор, направленный из элемента  $dV$  в точку  $p$ .

Поле магнитных моментов  $\bar{H}_{m(p)}$  представлено в виде:

$$\bar{H}_{m(p)} = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\bar{M} \cdot \bar{r}_{QP}}{\bar{r}_{QP}^3} dV.$$

Программа расчета магнитного поля в трехмерном пространстве положена в основу оптимизационного поиска геометрических размеров постоянного магнита для формирования магнитной системы космического телескопа. В этом процессе удалось получить оптимальные размеры элементарного магнита с учетом особенностей технологии изготовления и намагничивания магнитов с использованием заводского оборудования и оснастки, что существенно снижает стоимость МС телескопа.

Алгоритм оптимизационного расчета космической МС представлен на рис. 2. Математическая модель, на базе которой построен оптимизационный расчет, предусматривает определение оптимального геометрического размера элементарного магнита, получение необходимых прочностных показателей блоков МС после сборки из элементарных магнитов трекера, изготавливаемого из блоков с разным направлением намагниченности. Результаты расчетов позволяют определить тот уровень величины и однородности магнитного поля, при котором точность получения следа траектории космической частицы находится в допустимых для эксперимента пределах.

В соответствии с полученными расчетными характеристиками были изготовлены, намагничены и в соответствии с методикой эксперимента исследованы магниты на основе указанного выше сплава Nd-Fe-B. Форма магнитов была выбрана прямоугольной, а размеры соответствовали 20x40x40 мм. Однако по условиям оптимизации структуры магнитного поля в рабочей зоне МС и минимизации полей рассеяния пришлось применять магниты также и другой конфигурации (в углах МС) с разным направлением вектора намагниченности.

Пришлось учитывать также, что на величину магнитного поля и на уровень его однородности существенное влияние оказывает абсолютная величина зазоров между элементарными магнитами и

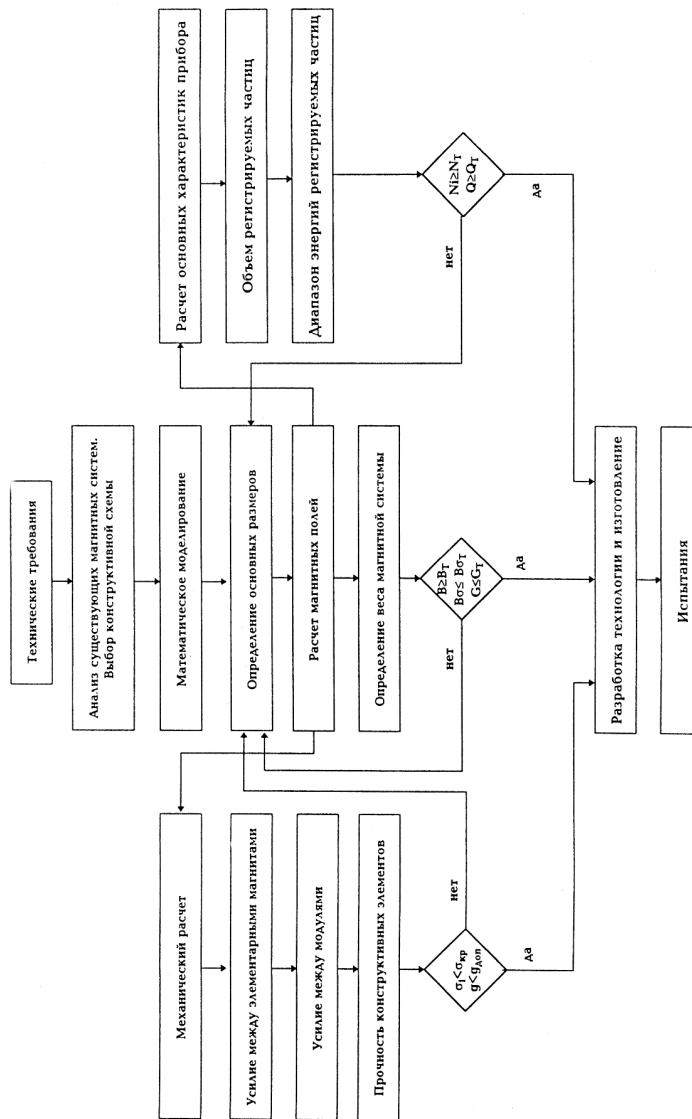


Рис. 2. Алгоритм выбора и создания оптимальной магнитной системы

степень разброса этого размера в сети зазоров МС. Необходимость обеспечения минимальной величины зазора между магнитами накладывает очень жесткие требования к технологическому процессу обработки поверхности магнитов с целью достижения высокого уровня параллельности и перпендикулярности плоскостей элементарного магнита. Особые требования предъявляются к склеиваемому магниту материалу. Склеивающий материал должен обеспечивать минимальную величину зазоров, а по механическим характеристикам не должен уступать прочности материала собственно магнитов и надежно выдерживать вибрационные нагрузки до 50 g на траектории разгона. Для склеивания магнитов в блоки, а блоков - в магнитную систему трекера, был разработан склеивающий состав на основе эпоксидной смолы типа «К-300». Трехкомпонентный склеивающий материал допускает максимальную температуру до  $t = 300^{\circ}\text{C}$ . Как показал опыт и расчеты, зазоры размером  $0,05 \div 0,1$  мм (не более) вполне осуществимы технологически и не вносят существенного изменения в однородную структуру магнитного поля.

Для обеспечения необходимой механической прочности магнитная система разделена по длине на пять равных частей с минимально возможными конструктивными промежутками, которые необходимы для размещения силиконовых детекторов. Конструкция МС должна обеспечивать доступ к микростриповым детекторам, устанавливаемым внутри.

Проведенные исследования показали, что термостабильность применяемых в МС постоянных магнитов на основе сплава Nd-Fe-B, характеризуется отклонением величины произведения индукции магнитного поля на его напряженность ( $B \cdot H$ ) в рабочей точке характеристики при изменении температуры магнита на  $1^{\circ}\text{C}$  величиной 0,1%. Соответствующим образом будет меняться величина индукции магнитного поля в рабочей зоне телескопа при изменении температурных условий во время полета.

Высокий уровень точности механической обработки граней твердого и хрупкого материала достигнут с помощью электроэрозионного специализированного оборудования и позволил таким образом выдерживать уровень зазоров между магнитами в пределах 0,1 мм. Склеивающий материал «К-300» обеспечил сохранение этого уровня зазора при необходимой величине механической прочности МС (что подтверждено вибрационными испытаниями).

В соответствии с разработанным технологическим процессом созданы два образца МС прибора «Памела». На рис. 3 приведен общий вид разработанной магнитной системы.



**Рис. 3. Общий вид магнитной системы прибора**

Первый образец магнитной системы предназначен для макетирования конструктивных решений, т.е. для совмещения ее с электронной частью, поэтому только один блок магнитной системы выполнен на основе магнитов, а остальные имитированы стальной конструкцией.

Вторая МС служит прототипом летного образца магнитной системы прибора «Памела» и будет использована учеными Италии для отработки всего комплекса оборудования космического телескопа.

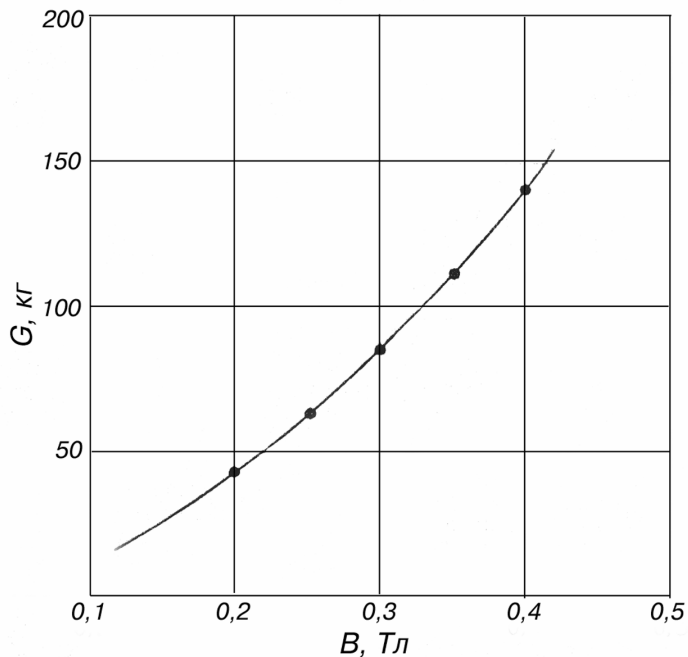
В созданной МС масса не превышает 150 кг; габаритные размеры  $L = 240$  мм,  $H = 228$  мм,  $B = 240$  мм.

Величина магнитного поля рассеяния составляет на расстоянии 50 см от центра МС не более 50 Гс. Для ограничения поля рассеяния установлен ферромагнитный экран. Расчеты, проведенные с целью определения эффективности экранирования, показали, что толщина экрана должна составлять 2 мм и располагаться он должен на расстоянии 30 мм от магнитов.

Термостатирование МС при расчетной величине изменения температуры окружающей среды обеспечивает необходимую в эксперименте с заряженными частицами точность измерений.

В качестве примера на рис.4 приведена зависимость массы трекера от величины рабочей магнитной индукции для различных сечений рабочей зоны при ее длине  $L = 500$  мм.





**Рис. 4. Зависимость массы трекера от рабочей магнитной индукции**

На рис.5 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных опытного образца МС. Расхождение составляет около 13%. Это расхождение связано с наличием погрешности при намагничивании готовых склеенных блоков, кроме того, при изготовлении партии магнитов не удалось достичь однородности их характеристик менее 5%.

Неоднородность магнитного поля обусловлена торцевыми полями рассеяния, так как длина модуля в опытном образце МС в два раза меньше воздушного зазора вдоль распределения потока основного магнитного поля.

На макетном образце магнитной системы получено подтверждение соответствия техническим требованиям, определяющим качество МС по взаимодействию с заряженными частицами:

- обеспечена необходимая величина произведения индукции магнитного поля на квадрат размера длины рабочей зоны  $B \times L^2 > 100 \text{ Тл} \cdot \text{см}^2$ ;

- обеспечен геометрический фактор  $S \times Q > 20 \text{ см}^2$ .

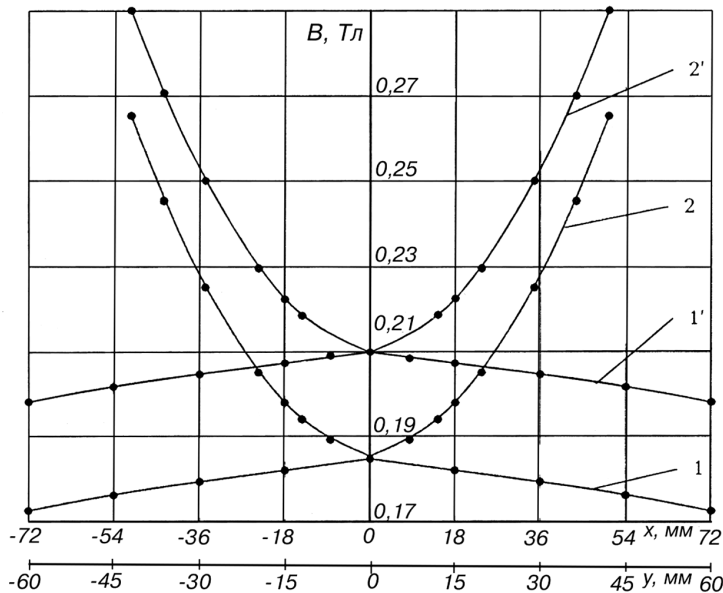


Рис. 5. Распределение магнитного поля вдоль оси  $X$  (1) и вдоль оси  $Y$  (2) в среднем сечении магнитного модуля: 1, 2 – эксперимент; 1', 2' – расчет

Изготовление макетного образца позволило проверить расчетные модели, конструктивные решения, принятые при проектировании, и отработать технологию изготовления магнитной системы для штатного образца таким образом, чтобы полностью удовлетворить технические требования, предъявляемые к МС в составе прибора «Памела».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Feng Z.X., Han S. /The 3D Analysis Calculation of Magnetic System Formed by Permanents and Ferromagnetic Medium// IEEE Transactions on Magnets. 1992. Vol. 28. № 1.
2. Meffino P., Repetto M. Boxio A. /Disign of Axisimmetnc Permanent Magnet Structure for Magnetic Resonance. Tomography// IEEE Transactions on Magnets. 1988. Vol. 24. № 2.
3. R. Zhon, K. Wang /Permanent Magnets with High Homogeneity for MR Imaging// Rep. Institute of Electrical Engineering of China. 1988.
4. M. Abele, H. Rusinek /Optimum Design of Yokeless Permanents// J. Appl. Phys. Vol. 67. May 1990.
5. Программа MULTIC для расчета трехмерных магнитных полей / Балбеков В.И., Ткаченко А.М., Федосеев А.И. // Препринт ИФВЭ. 81-121. Серпухов. 1981.