

P9-2025-9

В. М. Амосков и др.

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛИНЗ НА ПОСТОЯННЫХ
МАГНИТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА
ГРУППИРОВКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ МАГНИТОВ
ИЗ ВЫБОРКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ИЗМЕРЕННЫЕ
ЗНАЧЕНИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

Способ формирования поля прецизионных линз на постоянных магнитах с использованием алгоритма группировки индивидуальных магнитов из выборки, содержащей измеренные значения их параметров

Цель исследования — разработка и изготовление квадрупольной линзы (КЛ) для системы вывода пучка циклотрона ДЦ-140. В результате работы создана конструкция КЛ из однотипных блоков постоянных магнитов (ПМ) в виде прямоугольных параллелепипедов. Проведен входной контроль партии ПМ; на основе полученных результатов уточнена конфигурация и расположение магнитов. Предложен алгоритм, включающий этапы выборки, группировки и сортировки ПМ, реализованный в виде программного кода. Подход применим к различным магнитным системам, состоящим из однотипных блоков ПМ, причем число типов блоков не является ограничением для предложенного алгоритма.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Achieving the Desired Field Gradient in PM-Based Quads through Computerized Sort-Out of PM Units with Measured Parameters

The study is focused on the optimized design and fabrication of a PM-based quadrupole for beam transportation and focusing in the DC140 cyclotron. The quad has a modular configuration with a set of geometrically similar PM bricks in every module. Prior to assembly, geometrical and magnetic parameters were measured over the whole set of PMs. The measured data were used to adjust positions and orientations of PM bricks. A generalized procedure is proposed in a form of a program module to retrieve, sort out, and group specifications of individual PMs from the measurement database. This procedure can be applied to compare and select parameters for various magnets based on PM assemblies without limitation on the PM nomenclature.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

В. М. Амосков¹, Т. В. Глушенкова¹, Г. Г. Гульбебян², Н. С. Знаменщикова¹,
И. А. Иваненко², В. Д. Казанцев¹, Н. Ю. Казаринов², И. В. Калагин²,
М. В. Капаркова¹, Н. А. Крылова¹, В. П. Кухтин¹, Е. А. Ламзин¹,
А. А. Макаров¹, Д. Д. Мельников¹, А. Н. Неженцев¹, Д. А. Овсянников³,
Н. Ф. Осипов², М. В. Семенова⁴, С. Е. Сычевский¹, Н. А. Шатиль¹

¹ Акционерное общество «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «ВАЛТАР МАГНИТ», Королев, Россия

ВВЕДЕНИЕ

В ряде магнитных систем целесообразно отказаться от использования источников тока и применять только постоянные магниты (ПМ) [1, 2], возможно, в сочетании с магнитомягкими материалами, такими, например, как электротехнические стали. Использование техники коррекции таких магнитных систем (как с помощью магнитных материалов, так и с помощью ПМ) позволяет повысить точность формирования заданных пространственных распределений магнитного поля в рабочей области.

В системе вывода циклотрона ДЦ-140 Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (Дубна) [3, 4] в области низкого уровня поля предполагается использование квадрупольной линзы на постоянных магнитах (PMQ).

Численные исследования позволили осуществить выбор конфигурации линзы на постоянных магнитах квадратного сечения [5–7] (см. рис. 1, 2), обеспечивающей необходимые параметры и характеристики поля в канале [8]. В [6] также приведены полученные численным путем распределения

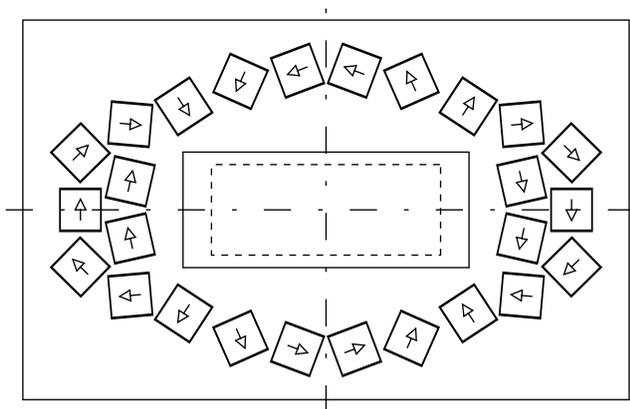


Рис. 1. Сечение квадрупольной линзы из постоянных магнитов для оптимальной конфигурации PMQ. Стрелками показаны направления намагниченностей. Пунктиром обозначена рабочая область 64×25 мм. Сплошные линии: апертура 80×32 мм, внешние габариты 170×106 мм

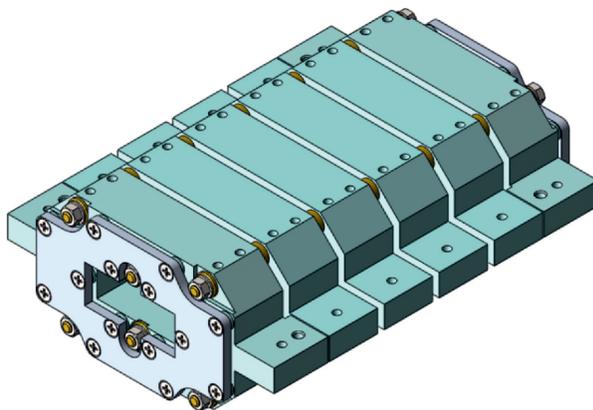


Рис. 2. Внешний вид РМК (фотореалистическое изображение)

квадрупольного поля с градиентом 9 Тл/м и его отклонения в поперечном сечении рабочей области 60×25 мм, соответствующие конкретным параметрам выбранной магнитной системы. Максимальное отклонение поля в рабочей области от требуемого значения не превышает 1%, среднее отклонение — 0,1–0,2%.

В АО «НИИЭФА» разработана конструкция квадрупольной линзы [7]. При создании таких магнитных систем удобно использовать одинаковые блоки ПМ простейшей формы, например, в виде прямоугольных параллелепипедов или цилиндров. Линза (см. рис. 1, 2) выполнена из немагнитной матрицы с установленными в ней ПМ. Магниты создают в рабочей области постоянное магнитное поле требуемой конфигурации.

По результатам проведенного численного моделирования [5–8] сформулированы требования к магнитной системе РМК и ее компонентам [7]. Анализ показывает, что решение актуальной задачи обеспечения достаточно высокой точности формирования градиента магнитного поля в линзе требуют учета реальных геометрических и магнитных характеристик ПМ.

Первоначально вычислительная модель [5–6] базировалась на идеализированном описании (см. [9–10]), которое подразумевало идентичность блоков. Однако даже при соблюдении допусков на геометрические размеры блоков ПМ, например, спеченных Nd-Fe-B высококоэрцитивных магнитов, по заявлениям самих производителей в силу существующей технологии производства повторяемость магнитных параметров не превышает $\pm 1,5\%$.

Это существенно ограничивает точность формирования магнитных систем (в первую очередь, открытых) и/или повышает их стоимость за счет увеличения выборки блоков ПМ.

Работа [7] описывает элементы технологии входного контроля качества каждого из всех необходимых базовых блоков ПМ. Элементы технологии обеспечивают анализ и оценку геометрических размеров ПМ, величины

и направления вектора намагничения, а также остаточной индукции и магнитной восприимчивости.

Эксплуатационные параметры РМҚ, представленные в табл.1, заимствованы из работы [7].

Таблица 1. Эксплуатационные параметры РМҚ

Параметр	Значение
Рабочая температура в режиме эксплуатации, °С	30–40
Максимальная температура в режиме наладки, °С	70
Уровень вакуума, Торр	10^{-7}

Базовой конфигурацией для проектирования РМҚ является система с двадцатью шестью магнитами сечением 11×11 мм (см. рис. 1).

В соответствии с разработанной конструкцией линзы к постоянным магнитам предъявлялись требования [7], из которых актуальными для данного исследования являлись:

- материал магнитов: Nd-Fe-B;
- класс магнитов: N35UH;
- геометрическая форма: прямоугольный параллелепипед $11 \times 11 \times 50$ мм;
- направление намагничения: коллинеарно одной из коротких сторон, $\pm 1^\circ$;
- средняя величина остаточной индукции $B_r = 1,185$ Тл, $\pm 3\%$ при температуре эксплуатации 30–40 °С;
- коэрцитивная сила магнитов по намагниченности (H_{cM}): не меньше 25 кЭ;
- линейный участок кривой размагничивания $M(H)$: от 0 до -15 кЭ (1200 кА/м).

Для изготовления РМҚ была приобретена партия из 630 магнитов, что позволяет собрать три, описанных в [7], образца.

1. ПОВТОРЯЕМОСТЬ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В БОЛЬШИХ ПАРТИЯХ МАГНИТОВ

После получения от производителя партии из 630 постоянных магнитов в ООО «ВАЛТАР» было принято решение просканировать все магниты по длинной стороне с использованием трехмерного датчика магнитного поля. Расстояние от датчика до поверхности магнита было выбрано около 4–5 мм и определялось максимальным динамическим диапазоном датчика, причем конкретная величина расстояния не принципиальна, так как речь идет о повторяемости магнитных параметров.

Опуская существенные для процедуры измерения детали (связанные, например, с изготовлением системы сканирования, оснастки для точной

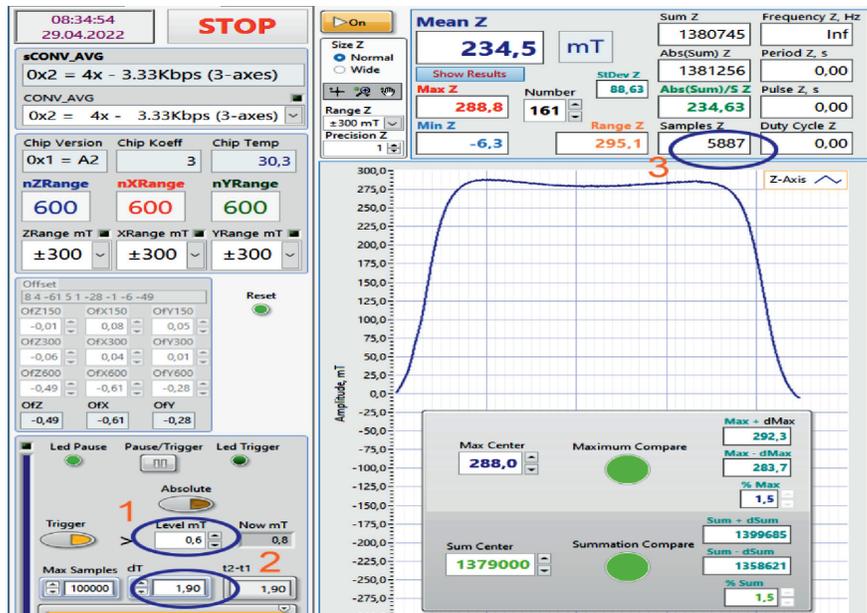


Рис. 3. Скрин программы измерений

установки магнитов, написанием программы анализа на системе программирования LabVIEW и т. п.), представим общую методику проведенных измерений (рис. 3):

- датчик удаляется на заведомо большее, по сравнению с размерами исследуемого магнита, расстояние;
- датчик перемещается к магниту без измерений до достижения величины магнитного поля 0,6 мТл (метка 1 на рис. 3);
- в процессе сканирования датчик измеряет поле в течение 1,9 с (метка 2 на рис. 3) или, что то же самое, 5900 образцов (метка 3 на рис. 3);
- анализируются форма распределения магнитного поля и попадание в $\pm 1,5\%$ -й интервал максимума и полного интеграла магнитного поля (изначально эти параметры определялись из партии случайным образом выбранных 60 магнитов).

В результате проведенных 640 измерений было отбраковано 7 магнитов (1,09% от общего количества), параметры которых сильно отличались как по форме, так и по реперным значениям амплитуды и интеграла (на рис. 4 приведено сравнение «эталонного» магнита № 161 и одного из отбракованных образцов № 454).

Таким образом, несмотря на распространенное «мнение» о повторяемости магнитных параметров, для критически важных приложений необходимо проводить тестирование каждого магнита.

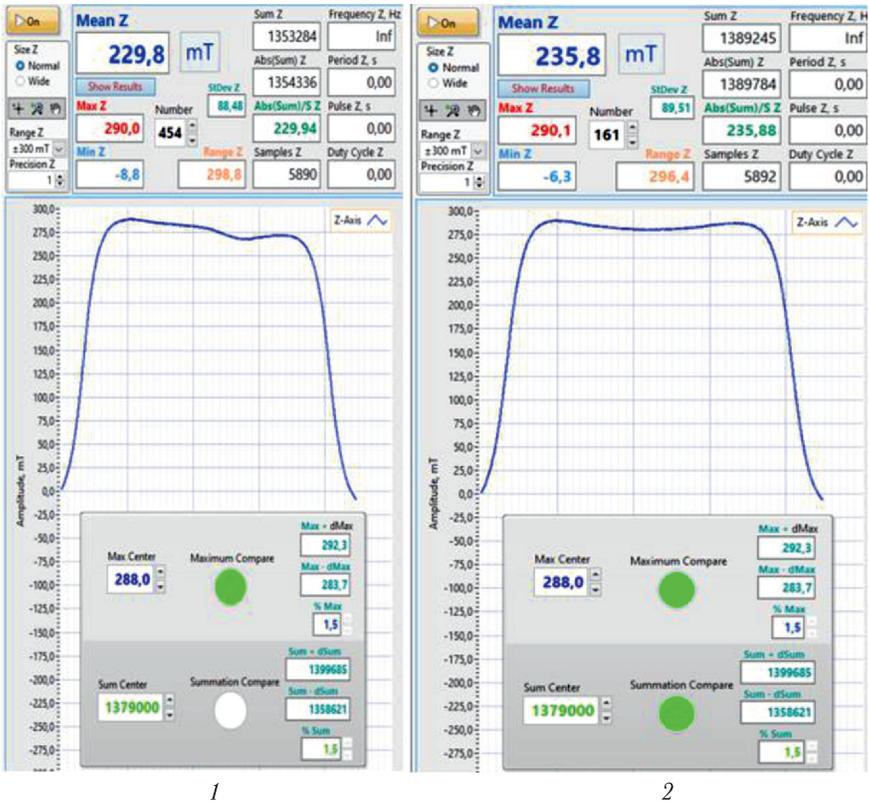


Рис. 4. Сравнение магнитных параметров «эталонного» магнита и одного из отбракованных образцов. 1 – бракованный образец; 2 – «эталонный» образец

2. КОРРЕКТИРОВКА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ПМ

Результаты входного контроля поля ПМ показали большую, чем предполагалось, неоднородность свойств в объеме магнита, а также отсутствие симметрии собственного поля магнита. В частности, на одинаковом расстоянии поле магнита со стороны северного и южного полюсов может отличаться больше, чем на 1%. Это не позволило применить разработанную ранее методику одновременного определения остаточной индукции и магнитной восприимчивости по результатам магнитных измерений. Поэтому методика определения магнитных свойств была скорректирована с использованием результатов магнитных измерений, выполненных ООО «ВАЛТАР».

С одной стороны, эти измерения подтверждают неоднородность свойств магнита по его объему. С другой стороны, эти данные позволили оценить

среднюю магнитную восприимчивость магнита $\chi = 0,035$ на линейном участке кривой размагничивания. По результатам измерений поля $B_x(x)$ в сопоставлении с численным моделированием магнита с заданной χ можно определить соответствующую остаточную индукцию B_r магнита (поскольку при заданных x и χ $B_x(x)$ пропорционально B_r).

Результаты обработки измерений поля магнитов представлены на рис. 5. Каждый магнит представлен точкой на плоскости $B_n - B_s$. Здесь B_n и B_s — поле на рабочей оси магнита на расстоянии 20 мм от его центра (или 14,5 мм от поверхности), соответственно, со стороны северного и южного полюсов магнита. Магниты с симметричным полем располагаются на диагональной линии $B_n = B_s$. Ниже диагонали расположены магниты с преобладающим B_n , выше — с преобладающим B_s .

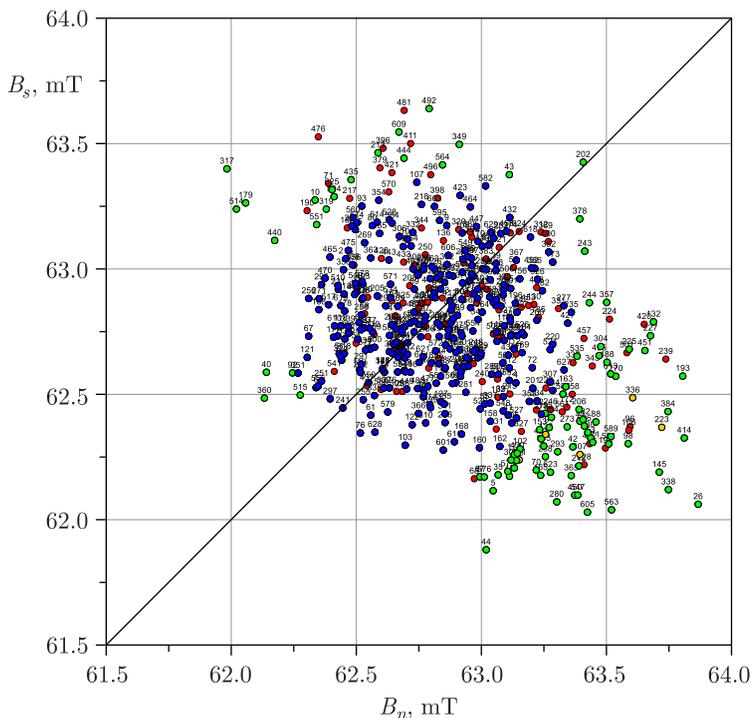


Рис. 5. Измеренные значения поля на рабочей оси магнитов на расстоянии 20 мм от центра магнита (14,5 мм от поверхности). B_n — поле со стороны северного полюса магнита, B_s — поле со стороны южного полюса магнита. Диагональной линии отвечает симметричное поле: $B_n = B_s$. Цифры над кружками соответствуют номерам магнитов от производителя. Красные кружки — магниты, отбракованные по результатам измерений размеров, желтые кружки — магниты, отбракованные по результатам измерений направления вектора намагниченности, зеленые кружки — магниты, отбракованные как имеющие наибольшие отклонения от среднего. Синие кружки — оставшиеся 312 магнитов для сборки двух линз

Представленные значения полей приведены к температуре 20°C с использованием измеренного в процессе работы совместного для датчика Холла и постоянного магнита температурного коэффициента $-0,22\%/^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 представлены данные о 519 подлежащих выборке магнитах из 630 поставленных. Часть (9 шт.) из числа поставленных магнитов были оценены как поврежденные, часть (10 шт.) магнитов была использована для дополнительных исследований, часть (2 шт.) имела размеры, не позволяющие провести измерения поля в измерительной оснастке. Кроме того, были исключены 90 магнитов, поле которых критически отличалось от требуемого, предположительно из-за сильных локальных неоднородностей.

Из этих 519 магнитов необходимо было выбрать 312 магнитов для сборки двух линз: основной и контрольной. Выбор осуществлялся таким образом, чтобы максимально уменьшить разброс свойств выбранных магнитов для обеспечения максимального качества поля квадрупольной линзы. Разброс свойств оценивался по среднеквадратическому отклонению поля магнита на заданном расстоянии (по обе стороны от магнита) и по максимальному отклонению от среднего:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N (B_i - \bar{B})^2}, \quad |\Delta B|_{\max} = \max |B_i - \bar{B}|, \quad \bar{B} = \frac{1}{N} \sum_N B_i, \quad (1)$$

где B_i — измеренное поле каждого магнита как с южной, так и с северной стороны, N — общее число измеренных величин (в 2 раза большее числа участвующих в выборке магнитов, поскольку поле для каждого магнита определяется с обеих сторон отдельно).

Исходные статистические данные по магнитам, подготовленным к выборке:

- количество — 519 шт.;
- среднее поле на расстоянии 20 мм — $\bar{B} = (\bar{B}_n + \bar{B}_s)/2 = 62,829$ мТл;
- средняя несимметрия поля — $\Delta\bar{B}_n = (\bar{B}_n - \bar{B}_s)/2 = 0,072$ мТл (0,11 %);
- среднеквадратичное отклонение поля с северной или южной стороны от среднего — $\sigma_B = 0,333$ мТл (0,53 %);
- максимальное отклонение поля с северной или южной стороны от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 1,037$ мТл (1,65 %).

3. ВЫБОРКА БЛОКОВ ПМ

Процедура выборки магнитов состояла из трех этапов.

На первом этапе из партии были исключены магниты, которые по результатам входного контроля размеров не проходили в отверстие со стороной $(11 + 0,03)$ мм измерительного калибра. Эти магниты на рис. 5 обозначены красным цветом. Таких магнитов оказалось 114 шт. После исключения этих магнитов статистические показатели изменились следующим образом: количество — 405 шт., среднее поле на расстоянии 20 мм — $\bar{B} = (\bar{B}_n + \bar{B}_s)/2 = 62,814$ мТл, несимметрия поля — $\Delta\bar{B}_n = (\bar{B}_n - \bar{B}_s)/2 = 0,078$ мТл (0,12 %), среднеквадратичное отклонение

поля от среднего — $\sigma_B = 0,337$ мТл (0,54%), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 1,053$ мТл (1,68%).

На втором этапе из партии были исключены магниты, которые по результатам входного контроля направления вектора намагниченности имели отклонение направления вектора намагниченности от нормали больше 2° . Эти магниты на рис. 5 обозначены желтым цветом. Таких магнитов (из оставшихся) оказалось 5 шт. После исключения этих магнитов статистика изменилась следующим образом: количество — 400 шт., среднее поле на расстоянии 20 мм — $\bar{B} = (\bar{B}_n + \bar{B}_s)/2 = 62,813$ мТл, несимметрия поля — $\Delta\bar{B}_n = (\bar{B}_n - \bar{B}_s)/2 = 0,072$ мТл (0,12%), среднеквадратичное отклонение поля от среднего — $\sigma_B = 0,333$ мТл (0,53%), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 1,053$ мТл (1,68%).

На третьем этапе из партии последовательно исключались магниты с максимальным отклонением поля от текущего среднего вплоть до требуемого количества магнитов (312 шт.). На рис. 5 исключенные магниты выделены зеленым цветом, оставшиеся — синим цветом. Окончательная статистика после выборки: количество — 312 шт., среднее поле на расстоянии 20 мм — $\bar{B} = (\bar{B}_n + \bar{B}_s)/2 = 62,799$ мТл, несимметрия поля — $\Delta\bar{B}_n = (\bar{B}_n - \bar{B}_s)/2 = 0,012$ мТл (0,019%), среднеквадратичное отклонение поля от среднего — $\sigma_B = 0,241$ мТл (0,38%), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 0,560$ мТл (0,89%).

Как видно, общая статистика по отобранным магнитам несколько улучшилась: интегральная несимметрия поля магнитов уменьшилась в 6 раз: с 0,12 до 0,019%. Однако разброс характеристик магнитов все еще оста-

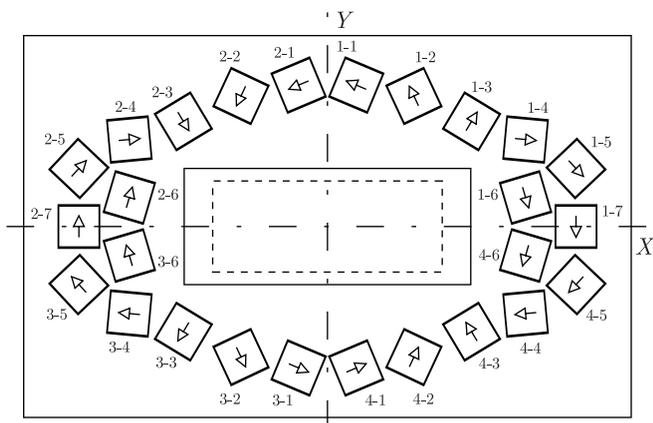


Рис. 6. Расположение постоянных магнитов в сечении квадрупольа после коррекции. Расчетные параметры: $B_r = 1,1874$ Тл ($T = 40^\circ\text{C}$), $\kappa = 0,035$, сечение 11×11 мм, протяженность магнитов в продольном направлении с учетом 6 секций линзы 6×50 мм. Стрелками показаны направления намагниченностей. Пунктиром обозначена рабочая область 64×25 мм. Сплошные линии: апертура 80×32 мм, внешние габариты 170×106 мм

ется значимым: 0,38 % в среднем и до 0,89 % в максимуме. Дальнейшее улучшение заключалось в правильной группировке отобранных магнитов.

Важно отметить, что независимо от дальнейшей группировки магнитов, средние характеристики выбранных магнитов останутся неизменными: $\overline{B} = 62,799$ мТл, $\varkappa = 0,035$. Поэтому уже на этом этапе можно провести окончательную коррекцию положений магнитов в сечении линзы для формирования требуемого поля (см. рис. 6).

4. ГРУППИРОВКА МАГНИТОВ

По условиям технического задания (ТЗ) критерием качества поля линзы является отклонение интеграла поля в продольном направлении от требуемого значения в каждой точке (xy) сечения в рабочей области апертуры:

$$\int_{z_1}^{Z_2} B_x dz - D_{0y} L_{\text{эфф}} \quad \text{или} \quad \int_{z_1}^{Z_2} B_y dz - G_{0x} L_{\text{эфф}}. \quad (2)$$

Линза состоит из шести одинаковых секций, пристыкованных друг к другу в продольном направлении, с одинаковым расположением в каждой из секций двадцати шести блоков ПМ. Необходимо выделить из партии магнитов группы по шесть штук (каждая группа соответствует своему положению в сечении линзы) так, чтобы средние магнитные свойства каждой группы по возможности были одинаковы.

Процедура группировки магнитов состояла из трех этапов.

На первом этапе магниты были сгруппированы по парам. В начале из числа несгруппированных магнитов выбирался магнит с наибольшими отклонениями B_n и B_s от средних \overline{B}_n и \overline{B}_s . Для него из оставшихся магнитов подбирался такой магнит, который в паре с предыдущим при усреднении давал B_n и B_s , максимально близкие к \overline{B}_n и \overline{B}_s . Процедура повторялась, пока все 312 магнитов не были сгруппированы по 156 парам. Результат такой группировки показан на рис. 7. Магниты до группировки обозначены голубым цветом, усредненные поля сгруппированных пар магнитов обозначены синим цветом. Статистические характеристики после группировки по парам: количество пар — 156 шт., среднее поле на расстоянии 20 мм — $\overline{B} = (\overline{B}_n + \overline{B}_s)/2 = 62,799$ мТл (не могло измениться), несимметрия поля — $\Delta\overline{B}_n = (\overline{B}_n - \overline{B}_s)/2 = 0,012$ мТл (0,019 % — также не могла измениться), среднеквадратичное отклонение поля от среднего — $\sigma_B = 0,026$ мТл (0,041 % — уменьшилось в 9 раз), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\text{max}} = 0,074$ мТл (0,12 % — уменьшилось в 7,5 раз).

На втором этапе пары группировались в четверки. В начале из числа несгруппированных пар выбиралась пара с наибольшими отклонениями B_n и B_s от средних \overline{B}_n и \overline{B}_s . Для нее из оставшихся пар подбиралась такая, которая при усреднении давала B_n и B_s , максимально близкие к \overline{B}_n и \overline{B}_s . Процедура повторялась, пока количество сгруппированных

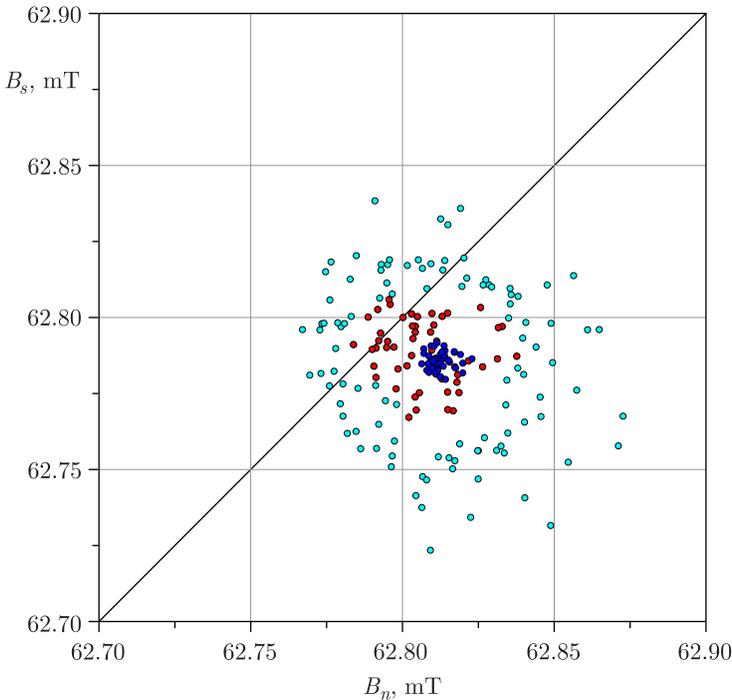


Рис. 8. Второй этап группировки магнитов — по четверкам. Голубые кружки — пары, выбранные для группировки по четверкам (104 пары), красные кружки — пары, не вошедшие в четверки (52 пары), синие кружки — средние поля сгруппированных четверок магнитов (52 четверки)

B_n и B_s , максимально близкие к \overline{B}_n и \overline{B}_s . Процедура повторялась, пока все магниты не были сгруппированы. Результат группировки показан на рис. 9. Пары до группировки выделены желтым цветом, четверки — голубым, усредненные поля сгруппированных шестерок магнитов обозначены розовым.

Статистические характеристики сгруппированных шестерок: количество шестерок — 52, среднее поле на расстоянии 20 мм — $\overline{B} = (\overline{B}_n + \overline{B}_s)/2 = 62,799$ мТл, несимметрия — $\Delta\overline{B}_n = (\overline{B}_n - \overline{B}_s)/2 = 0,012$ мТл (0,019%), среднеквадратичное отклонение поля от среднего — $\sigma_B = 0,012$ мТл (0,019% — в 20 раз меньше, чем по отдельным магнитам), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 0,018$ мТл (0,029% — в 30 раз меньше, чем по отдельным магнитам).

В табл. 2 сведены результаты последовательного выполнения всех этапов выборки и группировки магнитов для основного и контрольного экземпляров линзы.

Исходя из требований ТЗ к продольному интегралу поля линзы, не принципиально, в каком порядке магниты каждой группы следуют друг за

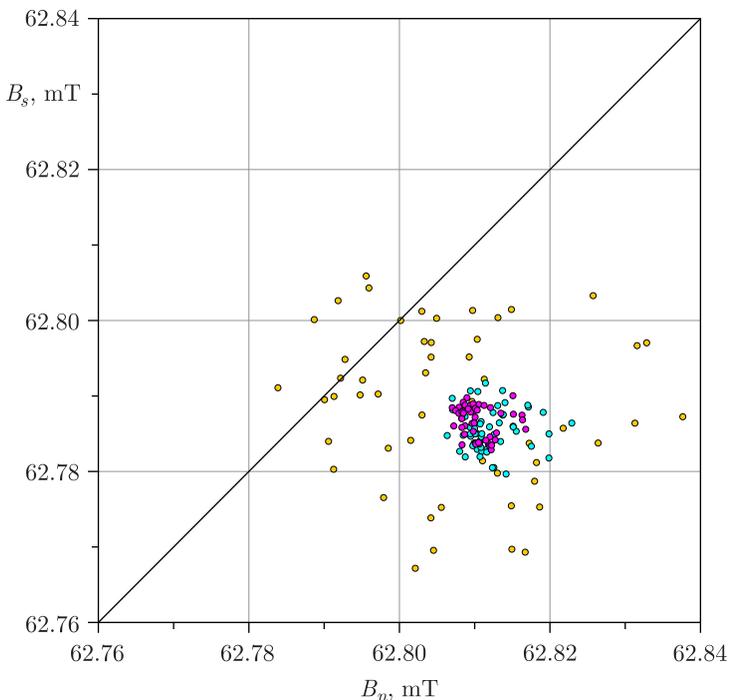


Рис. 9. Третий, окончательный этап группировки магнитов — по шестеркам. Желтые кружки — 52 пары магнитов перед группировкой; голубые кружки — 52 четверки магнитов перед группировкой; розовые кружки — средние поля сгруппированных 52 шестерок магнитов

другом в продольном направлении. Важно, чтобы магниты одной группы занимали одинаковое положение в поперечном сечении линзы, т. е. находились на одной линии в продольном направлении. Также не принципиально, какому именно положению в сечении соответствует каждая группа. Магниты одной группы могут быть переупорядочены между секциями. Любая группа из 6 магнитов может занимать любое отверстие линзы. Важно, чтобы эти 6 магнитов оставались на одной линии.

Поэтому для удобства сборки магниты в каждой группе были отсортированы по возрастанию их номеров (магниты пронумерованы поставщиком), а группы отсортированы по возрастанию номеров их первых магнитов (магнитов в первой секции). Полученные таким образом распределения магнитов по линзам (основной и контрольной), секциям и положениям (отверстиям в секциях) были сведены в специальные таблицы, которые использовались в процессе сборки и измерений.

Описанный выше алгоритм выборки, группировки и сортировки магнитов реализован в виде программного кода, на основе которого были

Таблица 2. Статистика по магнитам на разных этапах выборки и группировки

Этап	N	\overline{B} , мТл	$\Delta\overline{B}_n$, мТл	σ_B , мТл	$ \Delta B _{\max}$, мТл
Исходный	519×1	62,829	0,072 (0,11%)	0,333 (0,53%)	1,037 (1,65%)
Выборка, этап 1	405×1	62,814	0,078 (0,12%)	0,337 (0,54%)	1,053 (1,68%)
этап 2	400×1	62,813	0,072 (0,12%)	0,333 (0,53%)	1,053 (1,68%)
этап 3	312×1	62,799	0,012 (0,019%)	0,241 (0,38%)	0,560 (0,89%)
Группировка, этап 1	156×2	62,799	0,012 (0,019%)	0,026 (0,041%)	0,074 (0,12%)
этап 2	52×4	62,799	0,013 (0,021%)	0,014 (0,022%)	0,024 (0,038%)
этап 3	52×6	62,799	0,012 (0,019%)	0,012 (0,019%)	0,018 (0,029%)

получены представленные результаты. В качестве входных данных использовались результаты входного контроля ПМ.

Аналогично, по той же методике, с использованием того же программного кода, была произведена выборка, группировка и сортировка оставшихся магнитов для сборки прототипа линзы. Для получения необходимого количества магнитов (156 шт.) был увеличен допуск на поперечный размер магнита — с $(11 + 0,03)$ мм до $(11 + 0,04)$ мм. В силу того, что «хорошие» магниты уже были отобраны, статистика по магнитам для прототипа заметно хуже: среднее поле на расстоянии 20 мм — $\overline{B} = (\overline{B}_n + \overline{B}_s)/2 = 62,875$ мТл (на 0,12% больше), несимметрия поля — $\Delta\overline{B}_n = (\overline{B}_n - \overline{B}_s)/2 = 0,159$ мТл (0,25% — в 13 раз больше), среднеквадратичное отклонение поля от среднего — $\sigma_B = 0,159$ мТл (0,25% — в 13 раз больше), максимальное отклонение поля от среднего — $|\Delta B|_{\max} = 0,180$ мТл (0,29% — в 10 раз больше). Прототип изготавливался без коррекции положений магнитов и служил для отладки технологии производства, сборки и выходного контроля (измерения распределения поля в апертуре).

Таким образом, можно утверждать, что объем заказанной партии магнитов был выбран верно с тем, чтобы исключить магниты с большими отклонениями параметров.

Из 630 поставленных магнитов по результатам входного контроля 519 штук оказались пригодными. Средняя несимметрия поля подготовленных для выборки магнитов (519 шт.) составила 0,11%, среднеквадратичное отклонение поля от общего среднего 0,53%, максимальное 1,65%.

В результате выборки 312 магнитов и их группировки по 6 магнитов средняя несимметрия поля и среднеквадратичное отклонение поля снижены до 0,019%, а максимальное до 0,029%, т. е. более чем на порядок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной НИР сформирован технический облик квадрупольной линзы на постоянных магнитах, сформулированы требования к постоянным магнитам, разработаны методики их входного контроля.

Все приобретенные у поставщика постоянные магниты прошли входной контроль.

Предложен алгоритм, включающий этапы выборки, группировки и сортировки блоков постоянных магнитов, реализованный в виде программного кода, на основе которого были получены представленные результаты.

Подход носит достаточно общий характер, он применим к различным магнитным системам, образованным с помощью однотипных блоков постоянных магнитов, причем число типов блоков не является ограничением для рассматриваемого алгоритма.

В рассматриваемом конкретном случае линзы в качестве входных данных использовались результаты входного контроля ПМ.

Применение алгоритма привело к уменьшению:

1) среднеквадратичного отклонения поля от среднего — $\sigma_B = 0,012$ мТл (0,019%) 56 сгруппированных шестерок — в 20 раз по сравнению с отдельными магнитами;

2) максимального отклонения поля от среднего для шестерок ПМ — $|\Delta B|_{\max} = 0,018$ мТл (0,029%) — в 30 раз по сравнению с отдельными магнитами.

Предложенный алгоритм группировки допускает высокую степень автоматизации, что позволяет заметно уменьшить объем выборки постоянных магнитов без существенного увеличения затрат труда, он дает возможность рассмотреть две альтернативы: уменьшение выборки при заданной требуемой точности магнитной системы либо увеличение (с определенными оговорками) точности при сохранении объема выборки.

Вычислительная 3D-модель магнитной линзы включает описание каждого блока ПМ, соответствующего результатам применения предложенного алгоритма выборки и группировки этих блоков.

Изготовлены элементы магнитной системы, прошедшие контроль ОТК.

Изготовлено три образца линзы:

- технологический (прототип) — для отработки технологии изготовления и сборки;

- контрольный — для периодических измерений с целью проведения исследований временной зависимости магнитных свойств постоянных магнитов, связанных с так называемым эффектом старения;

- основной — для передачи заказчику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капчинский И. М., Скачков В. С., Артемов В. С. и др.* Опыт использования неявнополюсных квадрупольных линз с постоянными магнитами на линейном ускорителе И-2 // Труды IX Всес. совещ. по ускор. зарядж. частиц (Дубна, 16–18 окт. 1984 г.). Дубна, ОИЯИ, 1984. Т. 2. С. 57–60.
2. *Капчинский И. М., Лазарев Н. В.* О возможности использования постоянных магнитов в жесткофокусирующих каналах ионных магнитных ускорителей. Препринт ИТЭФ № 75. М., 1975, 17с.
3. *Mitrofanov S. et al.* The DC130 Project: New Multipurpose Applied Science Facility for FLNR // 14th Int. Conf. on Heavy Ion Accelerator Technology HIAT-2018, Lanzhou, China, 2018.
4. *Gulbekyan G. et al.* Conceptual Design of FLNR JINR Radiation Facility Based on DC130 Cyclotron // Proc. of 61st Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, 2018, Daejeon, Korea.
5. *Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионов Е. И., Гульбекян Г. Г., Едаменко Н. С., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А. (мл.), Осипов Н. Ф., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А.* Особенности разработки мультипольных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц, 1, Методика предварительного выбора параметров и конфигурации магнитов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17, вып. 4. С. 313–329; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.401>.
6. *Амосков В. М., Васильев В. Н., Гапионов Е. И., Гульбекян Г. Г., Едаменко Н. С., Иваненко И. А., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А. (мл.), Осипов Н. Ф., Родин И. Ю., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А.* Особенности разработки мультипольных элементов на основе постоянных магнитов для систем транспортировки заряженных частиц. Уточненная методика выбора конфигурации линзы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022 Т. 18, вып. 4. С. 454–472; <https://doi.org/10.21638/11701/spbu.10.2022.402>.
7. *Амосков В. М., Глушенкова Т. В., Гульбекян Г. Г., Знаменицкова Н. С., Иваненко И. А., Казанцев В. Д., Казаринов Н. Ю., Калагин И. В., Капаркова М. В., Крылова Н. А., Кухтин В. П., Ламзин Е. А., Ларионов М. С., Макаров А. А., Неженцев А. Н., Овсянников Д. А., Овсянников Д. А. (мл.), Осипов Н. Ф., Семенова М. В., Сычевский С. Е., Фирсов А. А., Шатиль Н. А.* Контроль параметров блоков постоянных магнитов для создания прецизионных элементов систем транспортировки заряженных частиц с использованием пространственных вычислительных моделей // Труды XV Международного семинара памяти В. П. Саранцева, 15–20 сент. 2024 г., Алушта, Россия.
8. *Kukhtin V., Firsov A., Kaparkova M., Lamzin E., Larionov M., Makarov A., Nezhentzev A., Rodin I., Shatil N., Gulbekyan G., Ivanenko I., Kazarinov N., Kalagin I., Osipov N., Edamenko N., Ovsyannikov D., Sytchevsky S.* Simu-

lation and design of the permanent magnet multipole for DC140 cyclotron // 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2021. 2021. P.99–101; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA03.

9. *Том Р., Тарр Дж.* Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. Основы расчета полей и сил. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.
10. *Гринберг Г. А.* Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948.

Получено 28 февраля 2025 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 17.03.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,28. Тираж 120 экз. Заказ № 61060.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/