

26-03



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

58857

1818

345с + g

P9-2003-26

И. Н. Мешков, Н. А. Морозов, Е. М. Сыресин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА ДЛЯ КОЛЬЦА
НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЭЛСИ

2003

1. Введение

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) разработан проект [1] дубненского электронного синхротрона (ДЭЛСИ) на энергию электронов 1,2 ГэВ. На основе этого проекта в Дубне будет создан источник СИ третьего поколения, что позволит проводить исследования в области атомной физики и физики конденсированных сред, биологии, медицины, химии, микромеханики и др.

Накопительное кольцо электронов в проекте ДЭЛСИ планируется создать на основе магнитных элементов, которые использовались ранее в накопителе AmPS (NIKHEF, Амстердам) [2], при этом существенно изменена оптика кольца, примерно в полтора раза уменьшен его периметр, а энергия электронов увеличена до 1,2 ГэВ. В накопителе ДЭЛСИ используются 32 поворотных дипольных магнита (табл.1).

Таблица 1. Параметры дипольного магнита ДЭЛСИ

Диапазон рабочих полей (Тл) (диапазон энергии электронов (ГэВ))	0,9 – 1,2 (0,9 – 1,2)
Радиус орбиты электронов в магните (м)	3,3
Длина магнита по железу (м)	0,59
Эффективная длина магнита (м)	0,64
Зазор между полюсами (мм)	38
Максимальный рабочий ток (А)	330
Максимальная мощность питания (кВт)	5
Горизонтальная рабочая апертура (мм)	±30
Интегральная относительная однородность магнитного поля в рабочей апертуре (ед. 10^{-4})	±5

2. Выбор параметров модификации дипольного магнита

При модификации дипольного магнита AmPS в магнит ДЭЛСИ требовалось при том же максимальном токе 330 А в обмотках магнита увеличить уровень рабочего поля с 1 до 1,2 Тл. Для этого расчетным способом была выбрана новая форма полюса магнита. Модификация полюса заключалась в уменьшении зазора между полюсами с 45 до 38 мм и в переходе от прямоугольной формы полюса к трапециевидальной (в поперечном сечении) с углом наклона боковой поверхности полюса к горизонтальной плоскости – 10° . На рис.1 приведена выбранная форма полюса дипольного магнита ДЭЛСИ в сравнении с исходной формой полюса магнита AmPS.

Расчеты магнитного поля проводились при помощи двумерной программы SUPERFISH [3] и трехмерной - RADIA [4] (рис.2). На рис.2 приведен вид расчетной модели дипольного магнита для программы RADIA. Расчетная и экспериментальная кривые намагничивания магнита (рис.3) совпадают вплоть до уровня поля 1Тл. Выше этого уровня имеется небольшое отличие, связанное с расхождением между реальной характеристикой стали магнита $\mu(B)$ и использованной в расчетной программе. Также наблюдается при сравнении расчетных и экспериментальных пространственных распределений магнитного поля (рис.4 – 6) для конфигурации полюса рис.1.

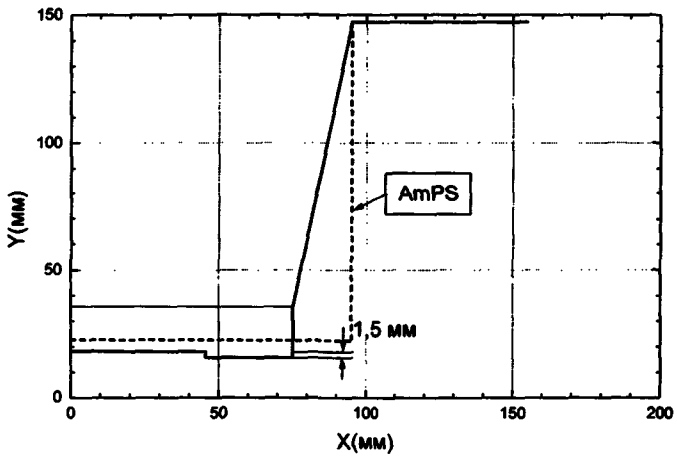


Рис.1. Форма полюса дипольного магнита ДЭЛСИ и AmPS (поперечное сечение).

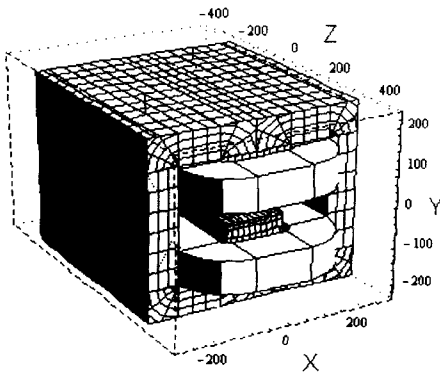


Рис.2. Вид расчетной модели дипольного магнита для программы RADIA

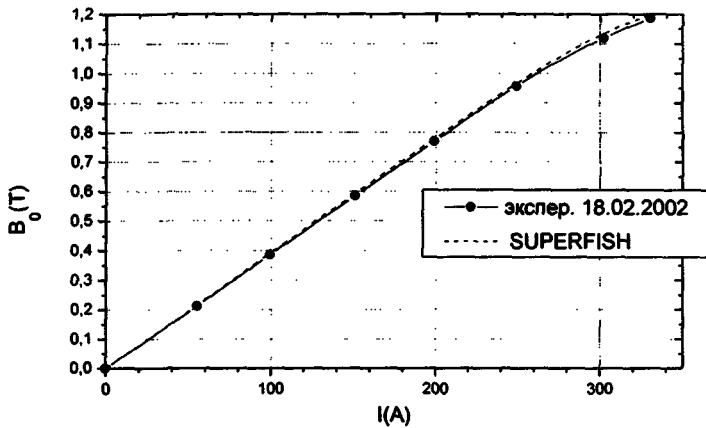


Рис.3.Кривые намагничивания магнита (центральное поле)

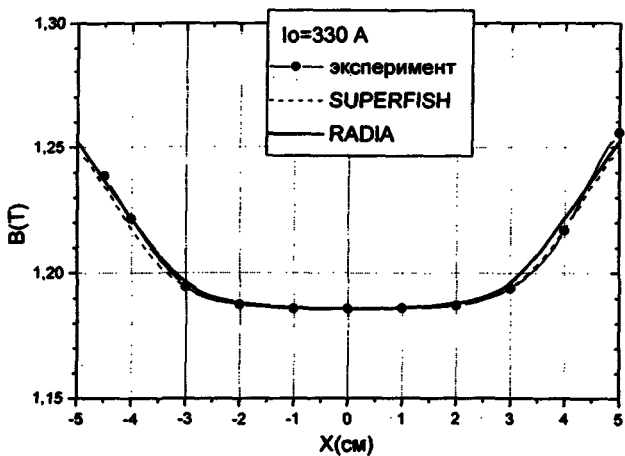


Рис.4. Магнитное поле в среднем сечении дипольного магнита, $I_0=330$ А

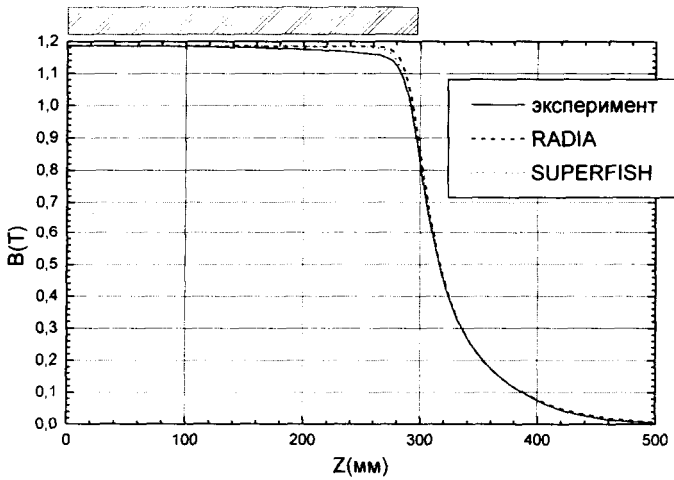


Рис.5. Магнитное поле вдоль осевой линии дипольного магнита, $I_0=330$ А

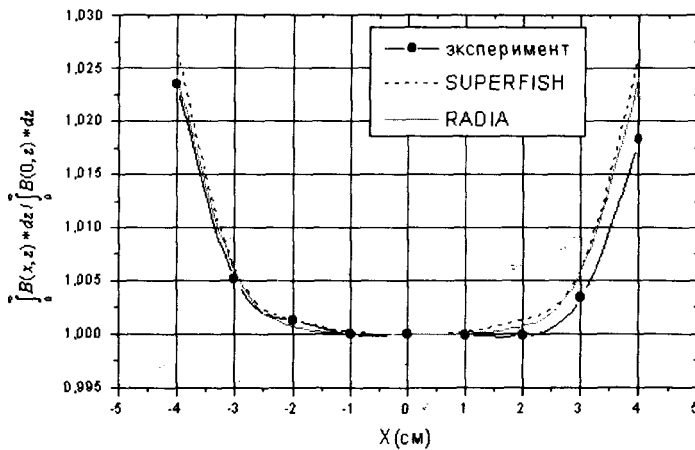


Рис.6. Нормализованное распределение интеграла магнитного поля, $I_0=330$ А

3. Экспериментальный стенд для измерений магнитного поля

Для проведения экспериментальных работ по измерению магнитного поля и выбору геометрии полюса дипольного магнита ДЭЛСИ был создан стенд магнитных измерений (рис.7). Его основу составил стол (1x5 м) с трехкоординатной головкой (оборудование получено из NIKHEF, Амстердам), обеспечивающей перемещение штанги с датчиками поля. Стенд оборудован стабилизированным источником питания постоянного тока фирмы "BRUKER" (450 А, 120 В) и подводом охлаждающей дистиллированной воды.

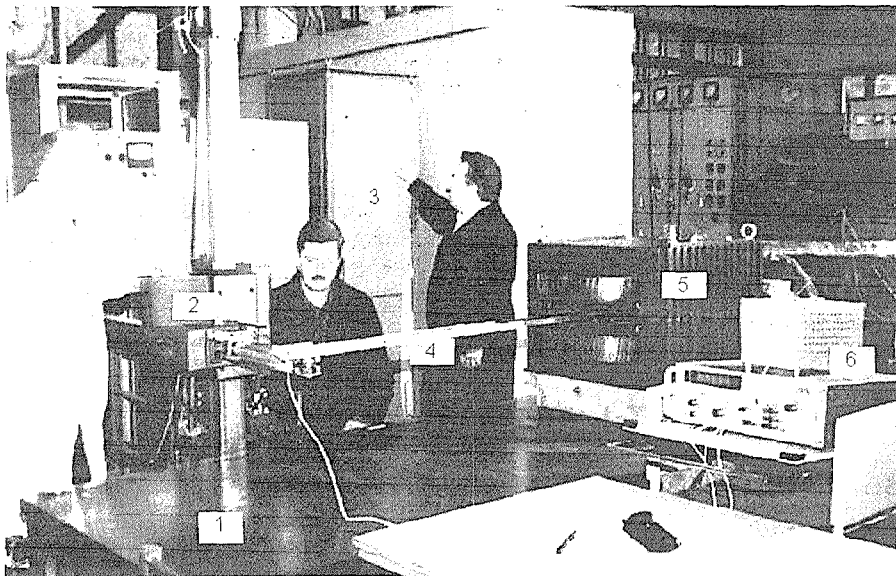


Рис.7. Общий вид стенда для магнитных измерений магнитов ДЭЛСИ.
1 – стол; 2 – трехкоординатная головка; 3 – источник тока; 4 – штанга;
5 – дипольный магнит; 6 – блок магнетометра Холла

В качестве датчиков магнитного поля использовались датчики двух типов:

- Датчик Холла с магнитометром МХ-12 [5]. Этот магнитометр использовался для измерений карт магнитного поля по точкам.
- Индукционная катушка с интегратором [6]. Катушка была изготовлена на пластмассовом сердечнике, имела размеры 10x1200 мм (ширина x длину), 40 витков провода $\varnothing 0,1$ мм и чувствительность 10 мВ/Гс. Индукционная катушка применялась для измерения однородности интеграла магнитного поля дипольного магнита в поперечном направлении.

4. Экспериментальная процедура измерений и формирования магнитного поля дипольного магнита

Для формирования магнитного поля дипольного магнита проводилась итерационная процедура изменения краевой геометрии его полюсов (как в поперечном, так и в продольном направлениях) с целью получения относительной однородности продольного интеграла магнитного поля в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ в горизонтальной апертуре ± 30 мм, в диапазоне рабочих полей магнита 0,9 – 1,2 Тл. Окончательная форма полюса магнита в поперечном и продольном сечениях приведена на рис.8. В поперечном сечении форма полюса приближается к форме полюса Роговского. При шиммировании магнитного поля диполя вычислялись продольные интегралы поля отдельно для области однородного поля магнита и для краевой области поля ($\int_0^{200 \text{ мкВ}} B(x,z) \cdot dz$ и $\int_{200 \text{ мкВ}}^{\infty} B(x,z) \cdot dz$ соответственно). Это позволяло минимизировать суммарный интеграл поля, в котором однородная часть поля и краевое поле суммируются с противоположными знаками (рис.9). В процессе шиммирования начальная неоднородность продольного интеграла магнитного поля была снижена в 10 – 25 раз. Окончательные результаты измерений распределений нормализованного продольного интеграла магнитного поля дипольного магнита ДЭЛСИ приведены на рис.10 для двух токов обмоток магнита. При шиммировании поля также на один–два порядка были снижены амплитуды нормальных квадрупольных и секступольных гармоник поля (рис.11).

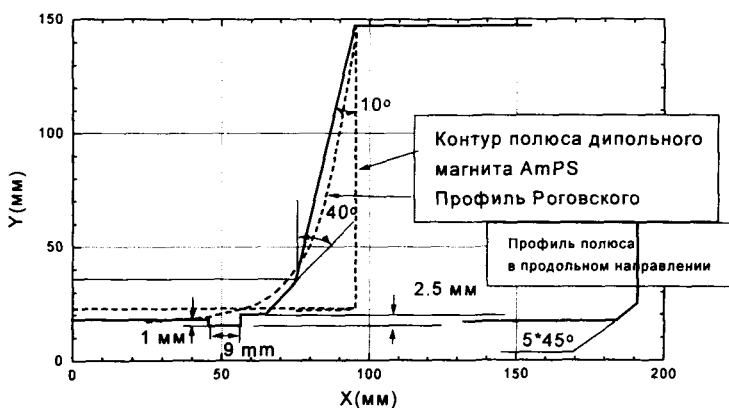


Рис.8. Окончательная геометрия полюса модифицированного дипольного магнита ДЭЛСИ

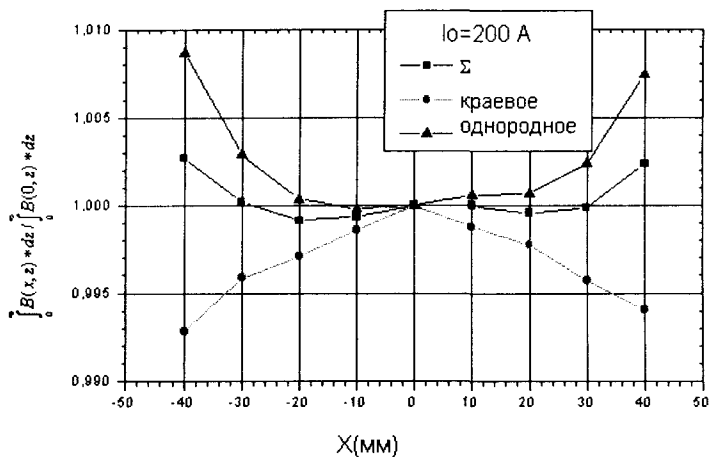


Рис.9. Нормализованный продольный интеграл магнитного поля для однородной, краевой областей магнита и суммарный ($I_0=200$ A)

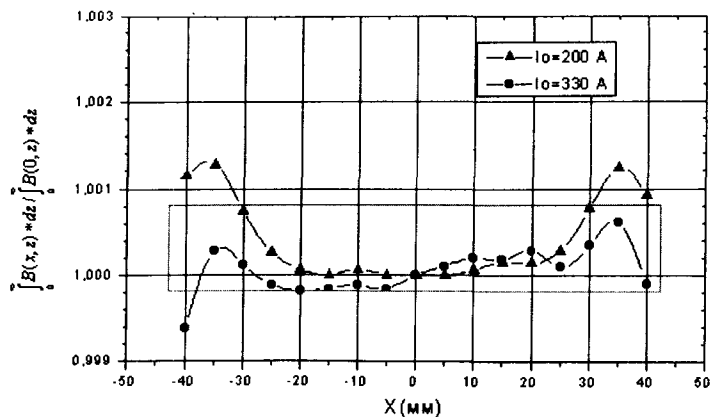


Рис.10. Окончательные нормализованные распределения продольного интеграла магнитного поля дипольного магнита ДЭЛСИ

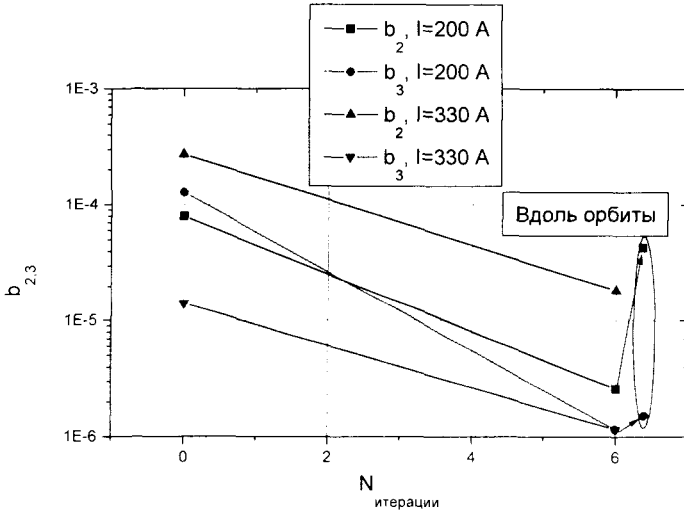


Рис.11. Нормализованные амплитуды нормальных квадрупольных и секступольных гармоник магнитного поля

При формировании магнитного поля дипольного магнита ДЭЛСИ измерения поля проводились по прямым, параллельным оси полюса магнита. Орбита электрона в области поля дипольного магнита имеет отклонение от прямой линии около 40 мм (рис.12). Для измерения интеграла поля вдоль орбиты электрона были проведены магнитные измерения интегральной индукционной катушкой вдоль ломаной линии (1-2-4), аппроксимирующей орбиту электрона. Расчет интеграла магнитного поля вдоль этой линии проводился путем

суммирования измерений трех интегралов поля:
$$\int_1^4 = \int_1^3 - \int_2^3 + \int_2^4 .$$

Результаты этих измерений в сравнении с измерениями однородности поля вдоль прямых линий для тока магнита 200 А приведены на рис.13. Квадрупольная и секступольная гармоники поля нанесены на рис.11 (в эллипсе). Видно, что в системе координат орбиты электронов горизонтальная апертура с отклонением интеграла поля $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ сокращается до ± 20 мм, возрастает квадрупольная гармоника поля, секступольная - практически не изменяется.

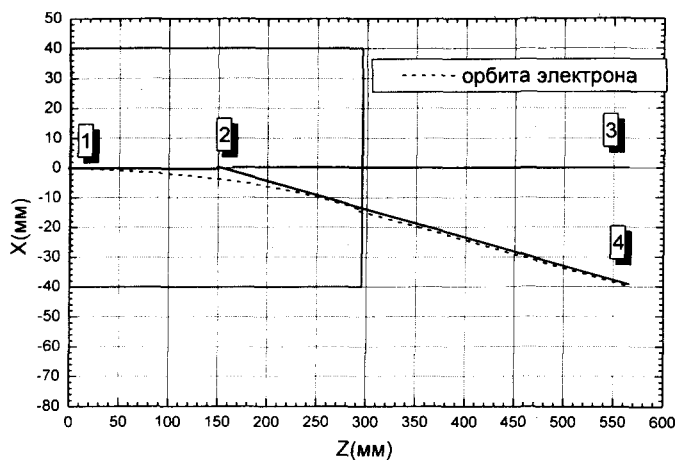


Рис.12. Орбита электрона в магнитном поле дипольного магнита и схема измерения интегральной однородности поля вдоль линии аппроксимации орбиты

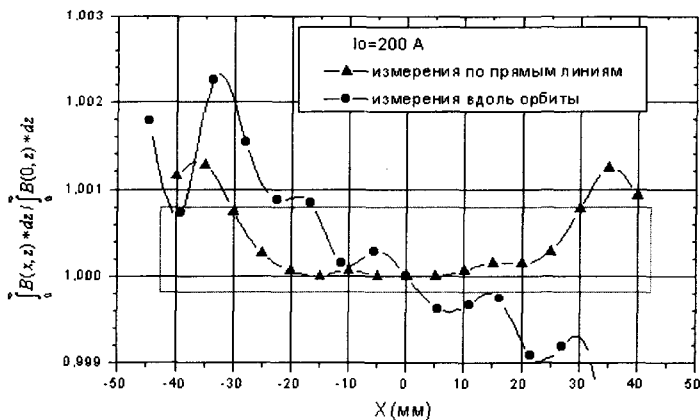


Рис.13. Относительная однородность интеграла магнитного поля дипольного магнита

5. Выводы

- Проведен выбор геометрии полюсов дипольного магнита ДЭЛСИ.
- Получена относительная точность формирования продольного интеграла магнитного поля $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ для горизонтальной апертуры магнита ± 30 мм в рабочем диапазоне индукций магнитного поля 0,9 – 1,2 Тл.
- Результаты работ по формированию магнитного поля диполя будут использованы для проектирования и изготовления серии из 32 дипольных магнитов для накопителя электронов проекта ДЭЛСИ.

Литература

- [1] I.V.Titkova et al, "Project of the Dubna Electron Synchrotron", EPAC'2000, Vienna, p.702.
- [2] R.Maas, Y.Wu, "New Layout of Amsterdam Pulse Stretcher", NIKHEF-K/APS/88-01, 1988.
- [3] I.H.Billen, L.M.Young, "POISSON SUPERFISH Documentation", LA-UR-96-1834, Los-Alamos, 1996.
- [4] J.Chavanne, O.Chubar, P.Elleaume. RADIA, a 3D Magnetostatic Computer Code, IMMW-12, ESRF, Grenoble, France, 2001.
- [5] С.А.Ивашкевич, Г.Г.Казакова. "Холловский магнетометр для измерений с повышенной точностью", ОИЯИ, Р13-91-283, Дубна, 1991.
- [6] Н.А.Морозов, П.Т.Шишлянников. " Экспериментальное определение медианной поверхности магнитного поля сильноточного фазотрона", ОИЯИ, Р9-80-889, Дубна, 1980.

Получено 6 февраля 2003 г.