

P13-2008-44

И. П. Юдин, Д. К. Гурьев, С. А. Долгий, А. Я. Кутов,
В. М. Луценко, А. А. Морозов, Г. П. Николаевский,
А. А. Номофилов, Н. С. Российская, А. Ю. Стариков,
Л. Н. Струнов, В. И. Шаров, Р. А. Шиндин, С. Н. Шкаровский

ИЗМЕРЕНИЯ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
АНАЛИЗИРУЮЩЕГО МАГНИТА СПЕКТРОМЕТРА
УСТАНОВКИ «ДЕЛЬТА–СИГМА»

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

*E-mail: yudin@jinr.ru

Юдин И. П. и др.

P13-2008-44

Измерения карты магнитного поля анализирующего магнита спектрометра установки «Дельта–Сигма»

Одной из основных задач проекта «Дельта–Сигма-эксперимент» являются измерения энергозависимостей в ГэВ-ной области нейтронного пучка спиново-зависимых NN -наблюдаемых $A_{00kk}(np)$, $A_{00nn}(np)$ и R_{dp} . Эти наблюдаемые определяются измерением с помощью магнитного спектрометра установки «Дельта–Сигма» выходов протонов в реакции $np \rightarrow pn$ перезарядки под углом 0° . Для определения с высокой точностью импульсов протонов перезарядки были выполнены измерения карты магнитного поля анализирующего магнита спектрометра установки.

Установка «Дельта–Сигма» расположена в корпусе 205 ЛВЭ ОИЯИ. Магнит спектрометра 2-СП-94 на канале 1В имеет внешние размеры $2,95 \times 2,12 \times 1,62$ м и апертуру (занятую пучком) $0,30 \times 0,09$ м. Измерение магнитного поля осуществлялось трехкомпонентным холловским магнитометром. Объем измерений составил $0,33 \times 0,0645 \times 1,02$ м.

В работе дается описание измерительной аппаратуры, процедуры измерений и их результатов, которые используются при обработке и анализе получаемых физических данных.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Yudin I. P. et al.

P13-2008-44

Measurement of the Magnet Field Map for the Analysing Magnet of the «Delta–Sigma» Spectrometer

One of the main goals of the «Delta–Sigma-experiment» project is measurement of the energy behaviour of spin-dependent NN observables $A_{00kk}(np)$, $A_{00nn}(np)$ and R_{dp} in the GeV region of the neutron beam. These observables are determined by measurement of proton yields from the $np \rightarrow pn$ charge-exchange reaction at 0° using a magnetic spectrometer. Measurements of the magnetic field map of the spectrometer magnet providing high accuracy in determining the proton momentum were carried out.

The «Delta–Sigma» set-up is placed at building 205 of the LHE, JINR. The spectrometer magnet 2-SP-94-1V has the external sizes $2.95 \times 2.12 \times 1.62$ m and aperture 0.30×0.09 m. A three-component Hall probe was used. The measurement volume is $0.33 \times 0.0645 \times 1.02$ m.

A description of the measuring equipment, method and results is presented. The results are used for analysis of the physical data.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Продвижение детальных исследований характеристик нуклон-нуклонного взаимодействия в область все более высоких энергий всегда было одной из важнейших задач современной экспериментальной физики. Развитие методики источников пучков поляризованных частиц для ускорения поляризованных протонов и дейтронов и развитие технологии поляризованных мишеней сделало доступным для измерений большой набор спин-зависимых наблюдаемых в NN -взаимодействии и тем самым корректное определение полного набора NN -амплитуд. При энергии пучков поляризованных частиц до 2,5 ГэВ для pp -взаимодействия и до 1,1 ГэВ для np -взаимодействия сейчас накоплен достаточно большой набор данных по спин-зависимым NN -наблюдаемым, позволяющий однозначно определить характеристики NN -рассеяния при этих энергиях (см. [1–4]).

Основная задача проекта «Дельта–Сигма» — получение полного набора экспериментальных данных по энергозависимостям спин-зависимых амплитуд упругого нейтрон-протонного рассеяния вперед в новой области энергий пучков продольно- и поперечно-поляризованных нейтронов 1,2–3,7 ГэВ, доступной в настоящее время только на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. Наличие в ЛВЭ поляризованного комплекса — источник поляризованных частиц «Полярис», ускорение и медленный вывод поляризованных дейтронов с кинетической энергией до 7,3 ГэВ, развитая система поляриметрии позволяют получать достаточно интенсивные, квазимонохроматические (полная ширина импульсного распределения $\sim 5\%$) пучки продольно- и поперечно-поляризованных нейтронов.

В рамках эксперимента планируется продолжать начатые ранее исследования энергозависимостей спин-зависимых NN -наблюдаемых разности полных np -сечений $\sigma_{L,T}(np)$ и одновременно с этими измерениями провести измерения энергозависимостей коэффициентов спиновых корреляций $A_{00kk}(np)$ и $A_{00nn}(np)$ для процесса упругого np -рассеяния назад (в с.ц.м.)

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

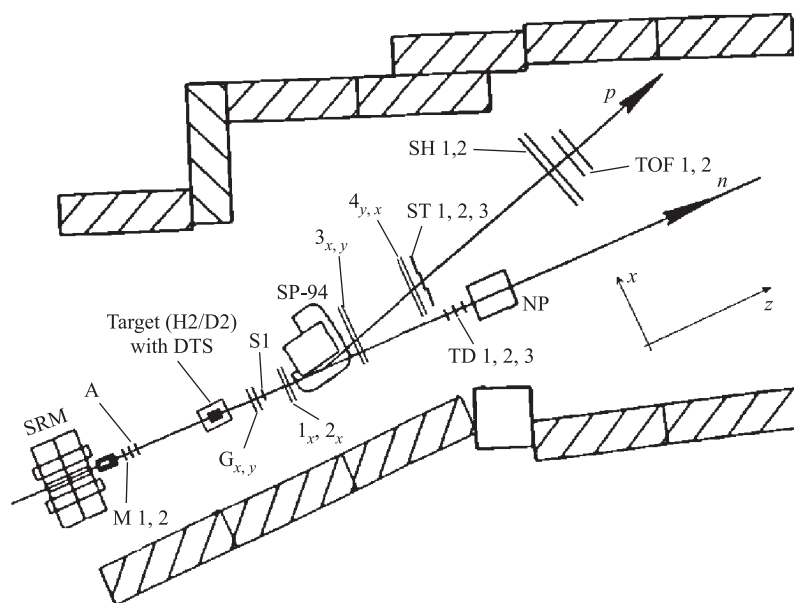


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Дельта-Сигма»: H₂/D₂ — поляризованная жидководородная (дейтериевая) мишень; SP-94 — спектрометрический магнит; SH — импульсный годоскоп; A, S1, S2, S3 — сцинтилляционные детекторы; G_{x,y}, 1_x, 2_x, 3_{x,y}, 4_{x,y} — система пропорциональных камер

Магнитная система спектрометра состоит из анализирующего магнита 2-СП-94-1В с межполюсным зазором 0,09 м, имеет внешние размеры 2,95 × 2,12 × 1,62 м и апертуру 0,30 × 0,09 м.

Ось z системы координат направлена в сторону движения частиц первичного n -пучка параллельно плоскости нижнего полюсного наконечника. Ось y направлена вертикально «вверх» по нормали к плоскости этого же полюсного наконечника. Ось x направлена так, чтобы получить правую систему координат. Центр спектрометрического магнита 2-СП-94-1В принимается за начало декартовой системы координат («правой» тройки xzy) спектрометра. При этом центр нижнего полюсного наконечника имеет координату ($x = 0$, $y = -0,045$ м, $z = 0$).

Объем измерений составил 0,33 × 0,0645 × 1,02 м. В работе дается описание измерительной аппаратуры и процедуры измерений. Использован опыт проведения подобных измерений (см. [5]). Приведены результаты измерений. Описываемые ниже измерения пространственного распределения трех компонент магнитного поля магнита 2-СП-94-1В проведены с целью получения информации о величине и однородности магнитного поля и построения ра-

бочей карты поля для различных режимов работы спектрометра. Полученные результаты используются при обработке физических данных.

1. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ МАГНИТА 2-СП-94-1В ДАТЧИКОМ ХОЛЛА

Измерения магнитного поля спектрометрического магнита 2-СП-94-1В (см. рис. 2) проводились при помощи датчика Холла.

Для измерений трех компонент магнитного поля использовались три независимых преобразователя Холла ПХ-43 (компонента B_y), ПХ-27 (компонента B_x), ПХ-22 (компонента B_z). Эти три преобразователя смонтированы в головке размером $8 \times 8 \times 8$ мм и аккуратно выставлены по осям соответствующих координат с погрешностью менее 1° . Сами же преобразователи имеют размер $2 \times 2 \times 1$ мм, они смонтированы на перпендикулярных плоскостях одного угла параллелепипеда измерительной головки.

Полученные экспериментальные значения переводились из милливольт в гауссы при помощи графиков калибровки (рис. 3, а, б, в).

Измерялись три компоненты вектора магнитной индукции: поперечная B_x , вертикальная B_y (основная компонента) и продольная B_z . Измерения

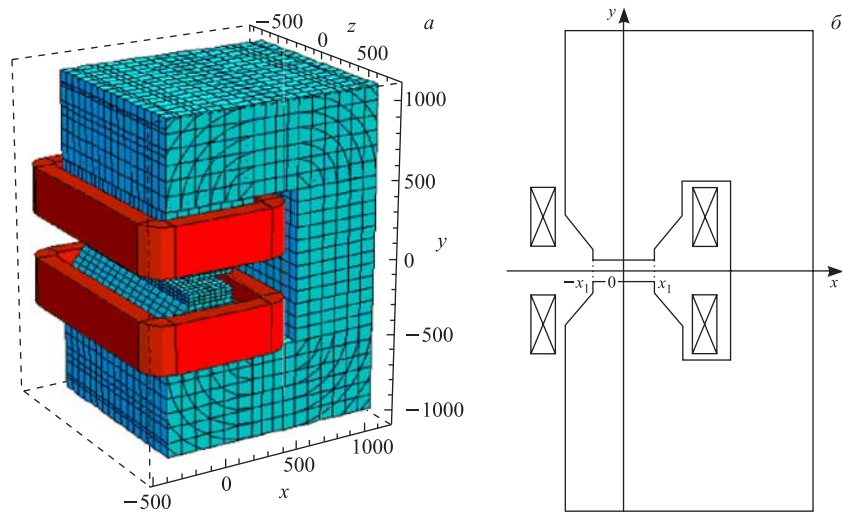
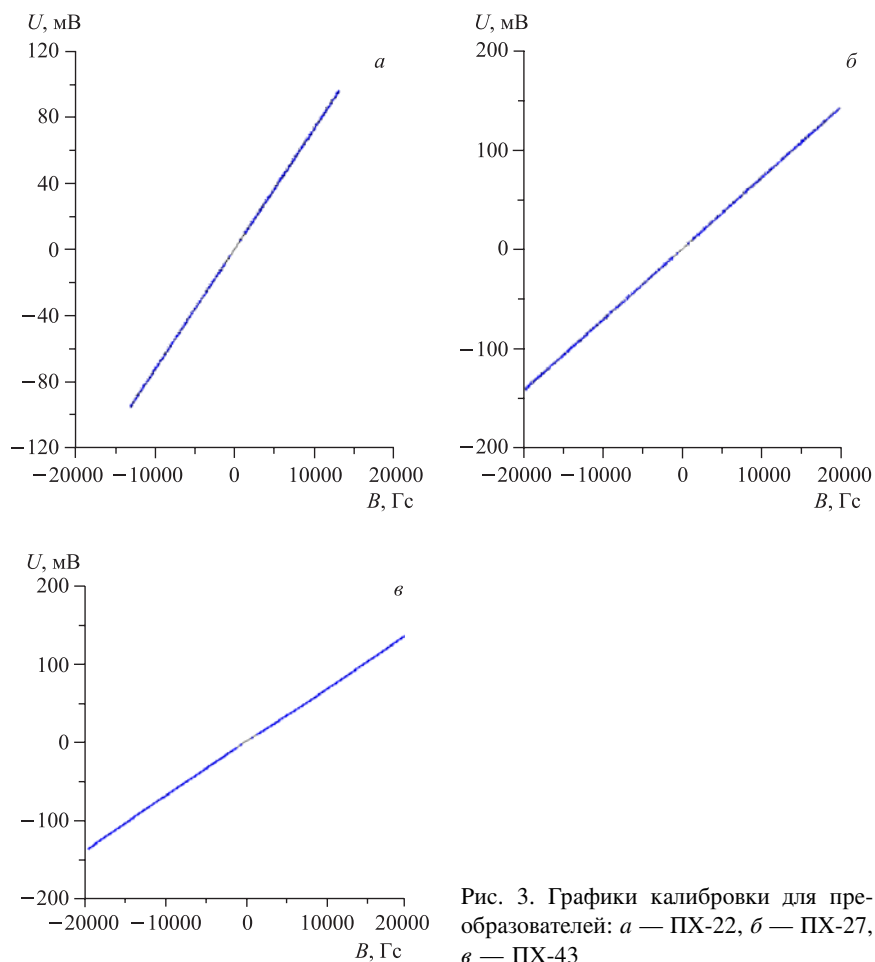


Рис. 2. Вид магнита 2-СП-94-1В: а — общий, размеры — в мм; б — разрез в плоскости xoy



проводились при трех различных значениях магнитного поля в магните 2-СП-94-1В, токи в обмотке были $I = 635$ А, 412 А и 240 А. При всех значениях тока снималась карта поля в медианной плоскости $y = 0$ м, а также в плоскостях $y = -0,026$ м, $y = +0,0385$ м, кроме того, для токов $I = 635$ А и 412 А проведены измерения в плоскостях $y = +0,026$, $y = +0,0335$ м. Шаг перемещения каретки по z был 2 см (в интервале от $-0,07$ до $-1,09$ м), по x шаг был и 1, и 2 см (в интервале от $-0,16$ м до $+0,17$ м).

Заметим, что максимальная y -координата апертуры у верхнего полюса равна 0,045, а минимальная у нижнего $y = -0,045$ м.

Координатная сетка измерений в плоскости zox показана на рис. 4.

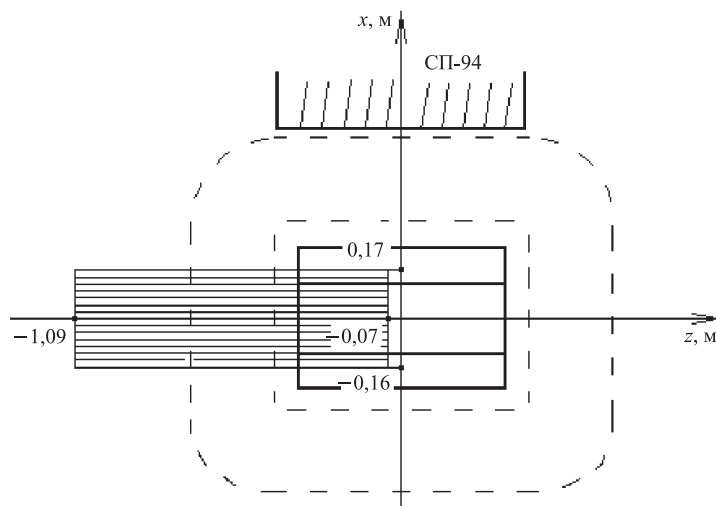


Рис. 4. Измерительная система (рама) и система координат, в которой проводились измерения относительно полюса магнита

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 2-СП-94-1В

Измерения проводились в объеме $0,33 \times 0,0645 \times 1,02$ м (см. рис. 4) при значениях тока в витке обмотки 240, 412 и 635 А.

Зависимость основной компоненты магнитной индукции $B_y(0, 0, z)$ от продольной координаты z при фиксированных $x = 0$ и $y = 0$ показана на рис. 5 для всех трех значений тока в обмотке магнита. В центре координат для тока $I = 240$ А магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 1,007$ Тл; при токе $I = 412$ А магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 1,497$ Тл и для тока $I = 635$ А — магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 1,723$ Тл.

Остановимся более подробно на результатах, полученных при токе $I = 635$ А. На рис. 6 приведено распределение компоненты B_y для медианной плоскости $B_y(x, 0, z)$.

Вдоль координаты x (поперечная к пучку координата) величина основной компоненты $B_y(x, 0, 0)$ на медианной плоскости в центре магнита равна 1,723 Тл и она практически сохраняется вдоль координаты x до края полюса ($x = \pm 0,15$ м). Резкий спад на этих краях уменьшает значение $B_y(x, 0, 0)$ до 1,0 Тл в точке $x = +0,17$ м. Компонента $B_x(x, 0, 0)$ под полюсом практически равна нулю, однако измеренные значения за краями полюса достигают 0,5 Тл в точке $x = +0,17$ м и $-0,5$ Тл в точке $x = -0,17$ м. Продольная компонента $B_z(x, 0, 0)$ здесь равна нулю.

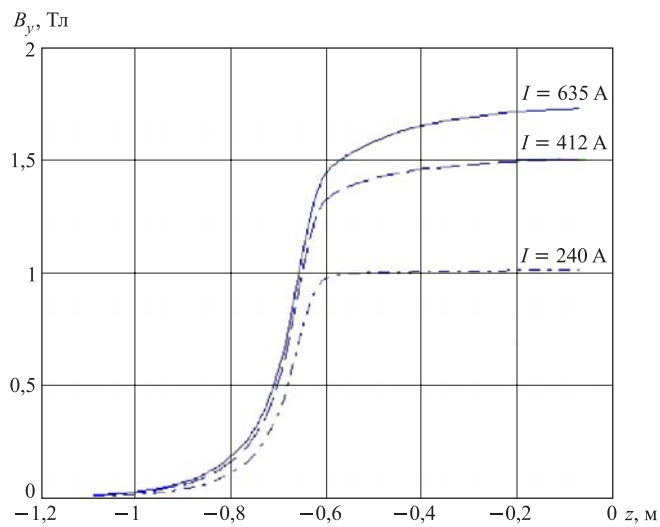


Рис. 5. Зависимость основной компоненты магнитной индукции $B_y(0, 0, z)$ от продольной координаты z при фиксированных $x = 0$ и $y = 0$ для трех значений тока в обмотке магнита

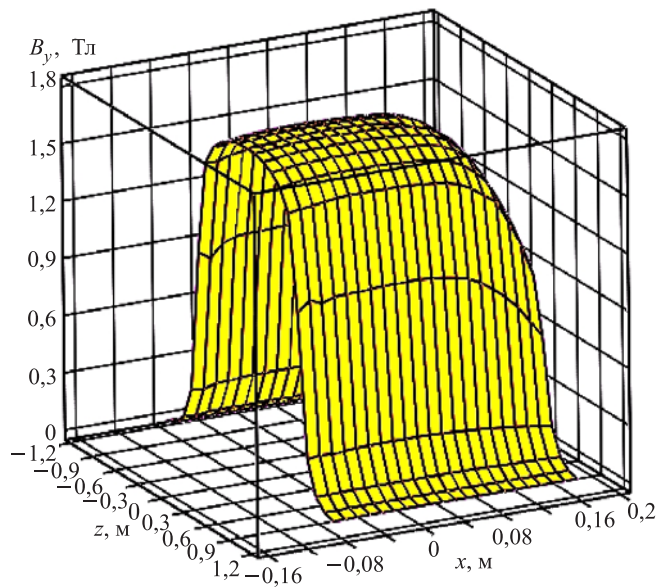


Рис. 6. Поверхность $B_y(x, y = 0, z)$ для медианной плоскости. $I = 635$ А

Аналогично вдоль координаты z компонента $B_y(0, 0, z)$ практически сохраняется до края полюса ($z = \pm 0,65$ м). Резкий спад на этих краях уменьшает значение $B_y(0, 0, z)$ до 0,0121 Тл в точке $z = -1,09$ м. Компонента $B_x(0, 0, z)$ под полюсом равна $-0,045$ Тл, измеренные значения на краях $z = \pm 0,65$ м практически сохраняют те же значения, но за краями полюса резко падают до нуля. Продольная компонента $B_z(0, 0, z)$ здесь везде равна нулю, однако на краях полюса при $z = -0,65$ м ее величина равна $+0,435$ Тл, а при $z = +0,65$ м ее величина равна $-0,435$ Тл.

Трехмерное распределение для компоненты B_y вблизи верхнего полюса $B_y(x, +0,0385, z)$ показано на рис. 7. Здесь измеренные значения $B_y(x, +0,0385, z)$ в центре ($x = 0, z = 0$) равны 1,7283 Тл и на краях (в точке $x = +0,17$ м, $z = 0$) — 1,807 Тл. Вдоль координаты z она плавно уменьшается до значения 1,1842 Тл на краю полюса ($z = \pm 0,65$ м). Резкий спад на этих краях уменьшает значение $B_y(0; 0,0385; 0)$ до 0,0120 Тл в точке $z = -1,09$ м.

Графики распределения магнитного поля вблизи верхнего полюса ($y = +0,0385$ м) приведены для компоненты B_x на рис. 8 и для компоненты B_z на рис. 9.

Вдоль координаты x компонента $B_x(x, 0, 0)$ ведет себя так, как на плоскости $y = 0$, но пик в точке $x = +0,17$ м увеличивается до 0,664 Тл. Продольная компонента $B_z(x, 0, 0)$ здесь также равна нулю. Вдоль координаты

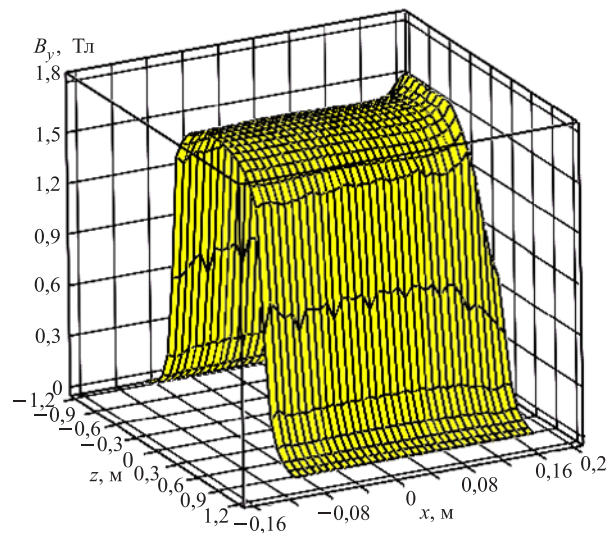


Рис. 7. Поверхность $B_y(x, y = 0,0385, z)$ для плоскости $y = +0,0385$ м. $I = 635$ А

z компонента $B_x(0; 0,0385; 0)$ под полюсом равна $-0,0155$ Тл. Измеренные значения на краях $x = +0,17$ м имеют резкие пики и достигают значения $-0,526$ Тл. Продольная компонента $B_z(0; 0,0385; 0)$ в центре равна $0,0197$ Тл, однако на краях полюса при $z = -0,65$ м ее величина равна $-0,6178$ Тл, а при $z = +0,65$ м ее величина равна $-0,6168$ Тл. На границе области измерений ($z = -1,09$ м) ее величина равна $-0,0047$ Тл.

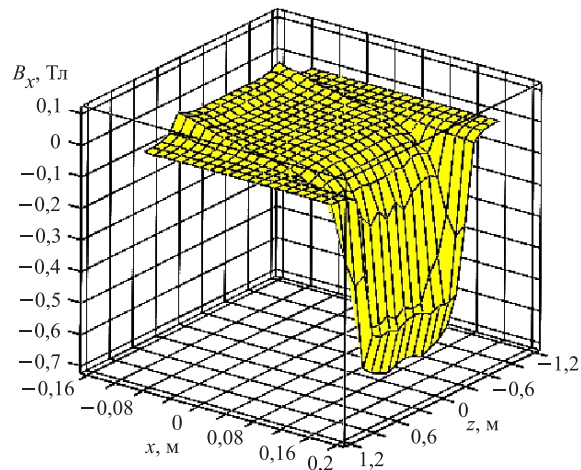


Рис. 8. Поверхность $B_x(x, y = 0,0385, z)$ для плоскости $y = +0,0385$ м. $I = 635$ А

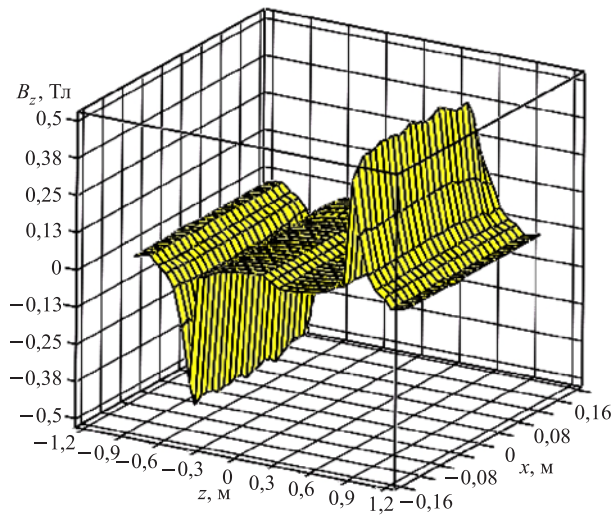


Рис. 9. Поверхность $B_z(x, y = 0,0385, z)$ для плоскости $y = +0,0385$ м

Для линии с $x = -0,15$ м и $y = +0,0385$ м на рис. 10 приведены зависимости компонент B_y, B_x, B_z от продольной координаты z .

В обычных условиях эксперимента через центральную часть апертуры магнита, где поле практически однородно, проходит большинство траекторий частиц. Поэтому естественно для приближенных расчетов использовать однородное поле, индукция которого равна индукции в центре магнита (B_c), а эффективная длина (L_{eff}) рассчитывается по формуле $L_{\text{eff}} = \Sigma/B_c$, где $\Sigma(x, y) = \int_{-L_1}^{+L_2} B_y(x, y, z) dz$ — интеграл поля вдоль центральной траектории от расстояния $-L_1$ — начала действия магнитного поля до расстояния $+L_2$ — конца действия поля. Соответствующие результаты расчетов основных характеристик магнита 2-СП-94-1В приведены в табл. 1–4 для четырех линий: $(0, 0, z)$, $(0, 0,0385, z)$, $(0,12, 0, z)$, $(0,12, 0,0385, z)$ для тока 240, 635 А и $(0, 0, z)$, $(0, 0,0335, z)$, $(0,12, 0, z)$, $(0,12, 0,0335, z)$ для тока 412 А.

Анализ табл. 1–4 показывает, что для траекторий, проходящих вблизи оси z , интегралы поля Σ практически совпадают. Но для линий, удаленных от

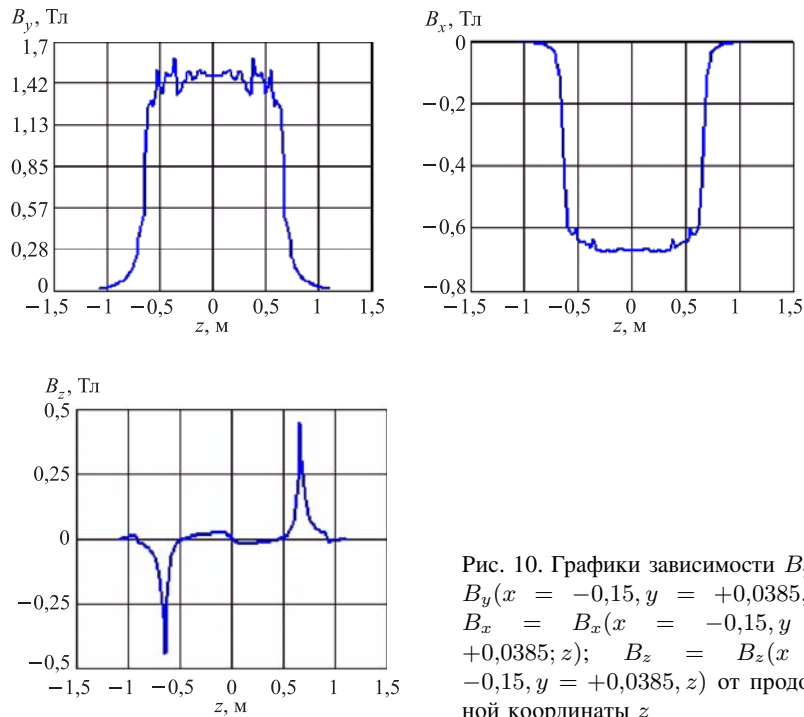


Рис. 10. Графики зависимости $B_y = B_y(x = -0,15, y = +0,0385, z)$, $B_x = B_x(x = -0,15, y = +0,0385, z)$; $B_z = B_z(x = -0,15, y = +0,0385, z)$ от продольной координаты z

Таблица 1. Основные характеристики магнита 2-СП-94-1В для линии (0, 0, z) для проведения приближенных вычислений

I, A	$B_c, Tл$	$\Sigma, Tл \cdot м$	$L_{eff}, м$
635	1,7231	2,3051	1,3379
412	1,4970	2,0389	1,3619
240	1,0065	1,4128	1,4037

Таблица 2. Основные характеристики магнита 2-СП-94-1В для линий (0, 0,0385 м, z), ток 240, 635 А, и (0, 0,335 м, z), ток 412 А для проведения приближенных вычислений

I, A	$B_c, Tл$	$\Sigma, Tл \cdot м$	$L_{eff}, м$
635	1,7283	2,3143	1,3391
412	1,4994	2,0447	1,3637
240	1,0071	1,4145	1,4046

Таблица 3. Основные характеристики магнита 2-СП-94-1В для линии (0,12 м, 0, z) для проведения приближенных вычислений

I, A	$B_c, Tл$	$\Sigma, Tл \cdot м$	$L_{eff}, м$
635	1,5948	2,1228	1,3311
412	1,4092	1,9116	1,3565
240	0,9661	1,3441	1,3913

Таблица 4. Основные характеристики магнита 2-СП-94-1В для линии (0,12, 0,0385 м, z), ток 240, 635 А, и (0,12 м, 0,335 м, z), ток 412 А для проведения приближенных вычислений

I, A	$B_c, Tл$	$\Sigma, Tл \cdot м$	$L_{eff}, м$
635	1,7308	2,2980	1,3278
412	1,5360	2,0574	1,3395
240	1,0321	1,4399	1,3951

центральной по координате x , например, с ($x = 0, 12$ и $y = 0$ м) наблюдается уменьшение интегралов поля Σ на 1% (см. табл. 3). Сравнение проводится для величины Σ центральной траектории. Для линий с ($x = 0, 12$ и $y = 0, 0385$ м) наблюдается также уменьшение интегралов поля Σ на 1% (см. табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения магнитного поля анализирующего магнита 2-СП-94-1В установки «Дельта–Сигма» в пространственном объеме с размерами

$0,33 \times 0,0645 \times 1,02$ м. Составлена трехмерная карта распределения всех компонент вектора магнитного поля в этом объеме. Построены графики характерных распределений компонент поля на уровне 1,00, 1,49 и 1,72 Тл. Приведено описание измерительной аппаратуры и процедуры измерений.

Измерения выполнены с погрешностью в величине $\Delta B/B \leq 0,5\%$ (≤ 70 Гс на уровне 1,7 Тл в центре магнита) для области поля вблизи границ полюсов и $\Delta B/B \leq 0,1\%$ (10 Гс на уровне 1,7 Тл в центре магнита) — для остальной области измерений.

Эти результаты будут использованы при обработке полученных в ходе эксперимента физических данных.

Работа проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта РФФИ № 07-02-01025а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sharov V.I et al.* Measurements of the Total Cross-Section Difference $\Delta\sigma_{L(np)}$ at 1.39; 1.69; 1.89 and 1.99 GeV. JINR Preprint E1-2004-87. Dubna, 2004;
Sharov V.I et al. Measurements of the Total Cross-Section Difference $\Delta\sigma_{L(np)}$ at 1.39; 1.69; 1.89 and 1.99 GeV // ЯФ. 2005, Т. 68, № 11, С. 1858.
2. *Sharov V.I. et al.* // Czech. J. Phys. 2004. V. 54. P. B173–B178.
3. *Sharov V.I. et al.* Measurements of Energy Behaviours of Spin-Dependent np -Observables over a GeV Region, Dubna «Delta-Sigma» Experiment // European Physical Journal. 2004. V.C. 37. P. 79–90.
4. *Sharov V.I. et al.* Measurements of Energy Behaviors of Spin-Dependent np -Observables over 1.2–3.7 GeV Energy Region. Dubna «Delta-Sigma Experiment» // Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ. ОИЯИ, Дубна, 2006. С. 118–129.
5. *Балдин А. А. и др.* Измерение объемной карты магнитного поля для магнитооптического спектрометра МАРУСЯ. Препринт ОИЯИ P13-2006-67. Дубна, 2006.

Получено 28 апреля 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 11.08.2008.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,06. Тираж 325 экз. Заказ № 56269.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/