

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

*И. П. Юдин¹, Д. К. Гурьев, С. А. Долгий, А. Я. Кутлов,
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*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Одной из основных задач проекта «Дельта–Сигма-эксперимент» являются измерения энергезависимостей 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.

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.

PACS: 29.30 Aj; 41.20.Gz

ВВЕДЕНИЕ

Продвижение детальных исследований характеристик нуклон-нуклонного взаимодействия в область все более высоких энергий всегда было одной из важнейших задач

¹E-mail: yudin@jinr.ru

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.

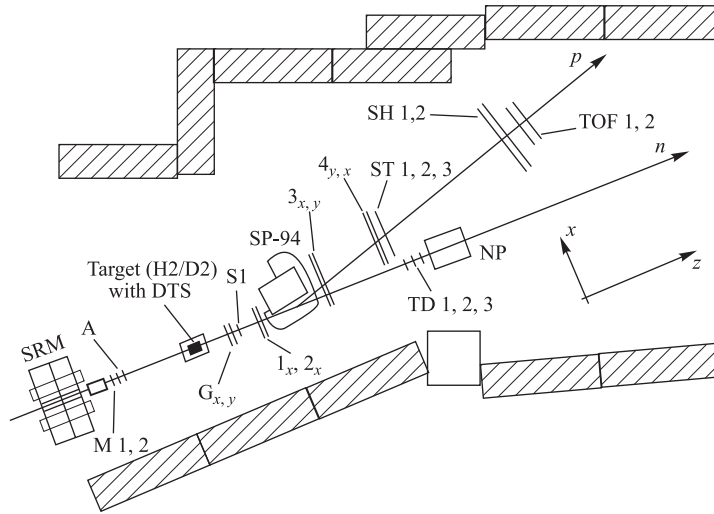


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Дельта-Сигма»: H2/D2 — поляризованная жидководородная (дейтериевая) мишень; SP-94 — спектрометрический магнит; SH — импульсный годоскоп; A, S1, S2, S3 — сцинтилляционные детекторы; G_{x,y}, 1_x, 2_x, 3_{x,y}, 4_{x,y} — система пропорциональных камер

Магнитная система спектрометра состоит из анализирующего магнита 2-СП-94-1В с межполюсным зазором 0,09 м, имеет внешние размеры $2,95 \times 2,12 \times 1,62$ м и апертуру $0,30 \times 0,09$ 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 xyz) спектрометра. При этом центр нижнего полюсного наконечника имеет координату ($x = 0, y = -0,045$ м, $z = 0$).

Объем измерений составил $0,33 \times 0,0645 \times 1,02$ 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 рабочей 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 (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

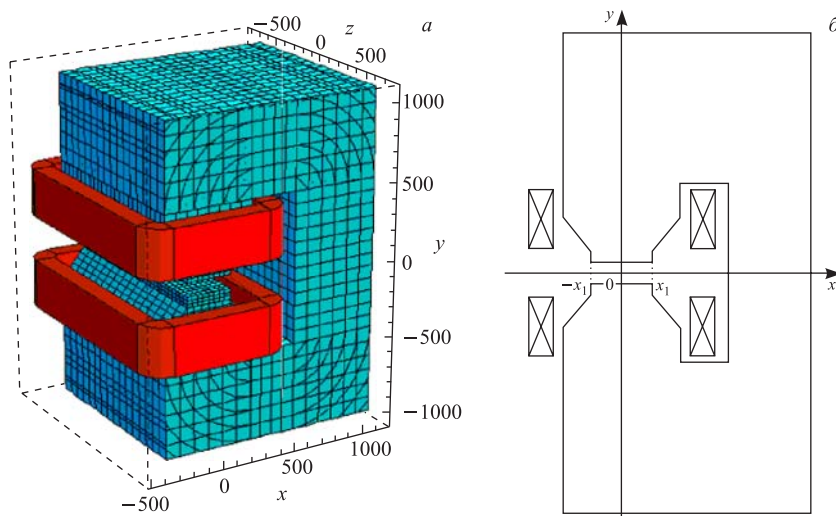


Рис. 2. Вид магнита 2-СП-94-1В: а) общий, размеры — в мм; б) разрез в плоскости xOy

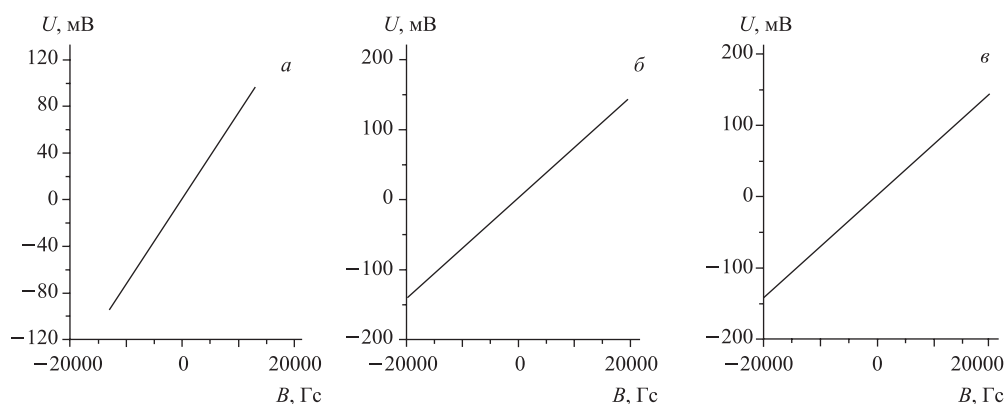


Рис. 3. Графики калибровки для преобразователей: а) ПХ-22; б) ПХ-27; в) ПХ-43

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–в).

Измерялись три компоненты вектора магнитной индукции: поперечная B_x , вертикальная B_y (основная компонента) и продольная B_z . Измерения проводились при трех различных значениях магнитного поля в магните 2-СП-94-1В, токи в обмотке были $I = 635$, 412 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 $I = 635$ 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 1 , и 2 см (в интервале от $-0,16$ до $+0,17$ м).

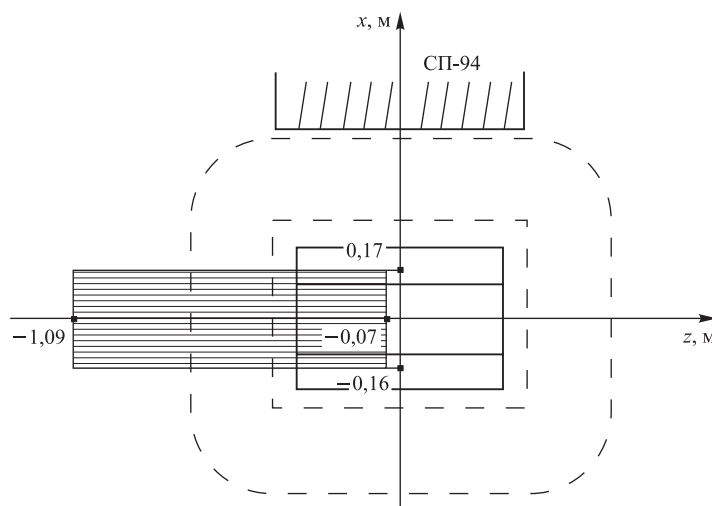


Рис. 4. Измерительная система (рама) и система координат, в которой проводились измерения относительно полюса магнита

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.

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.

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.

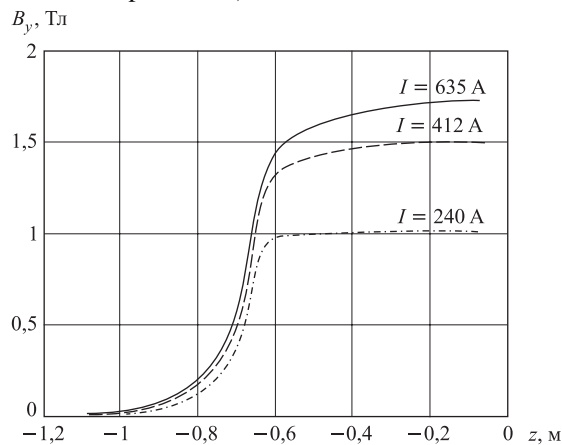


Рис. 5. Зависимость основной компоненты магнитной индукции $B_y(0, 0, z)$ от продольной координаты z при фиксированных $x = 0$ и $y = 0$ для трех значений тока в обмотке магнита

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

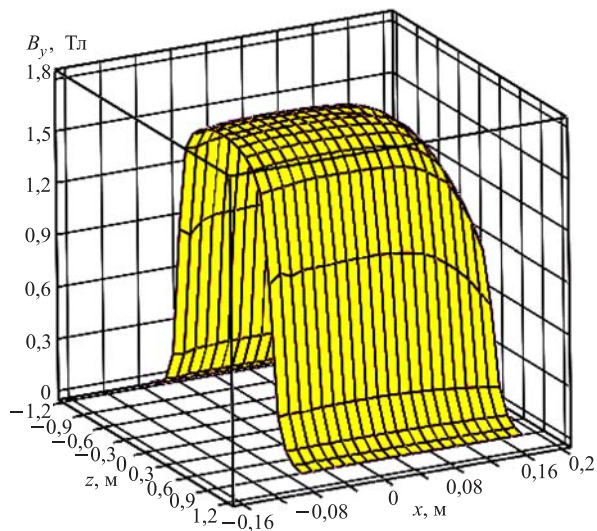


Рис. 6. Поверхность $B_y(x, y = 0, z)$ для медианной плоскости. $I = 635 \text{ А}$

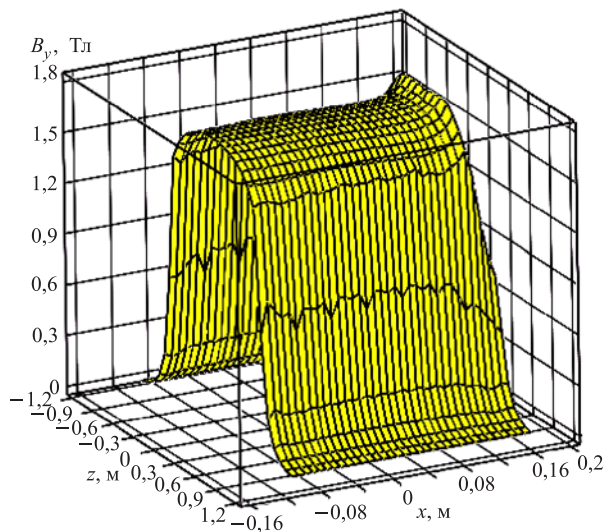


Рис. 7. Поверхность $B_y(x, y = 0,0385, z)$ для плоскости $y = +0,0385 \text{ м}$. $I = 635 \text{ А}$

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 z компонента $B_x(0; 0,0385$ м; $0)$ 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 $B_z(0; 0,0385$ м; $0)$ 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.

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 .

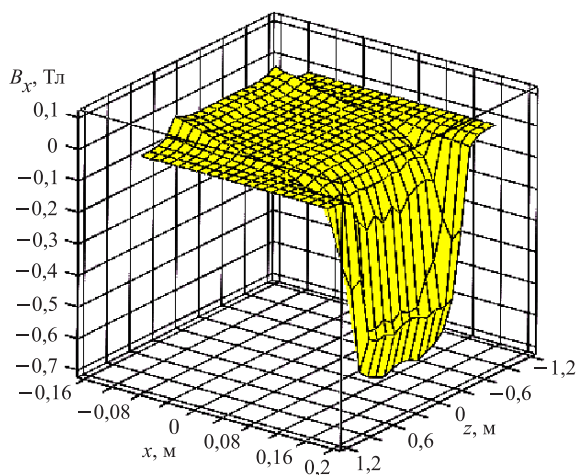


Рис. 8. Поверхность $B_x(x, y = 0,0385$ м, $z)$ для плоскости $y = +0,0385$ м. $I = 635$ А

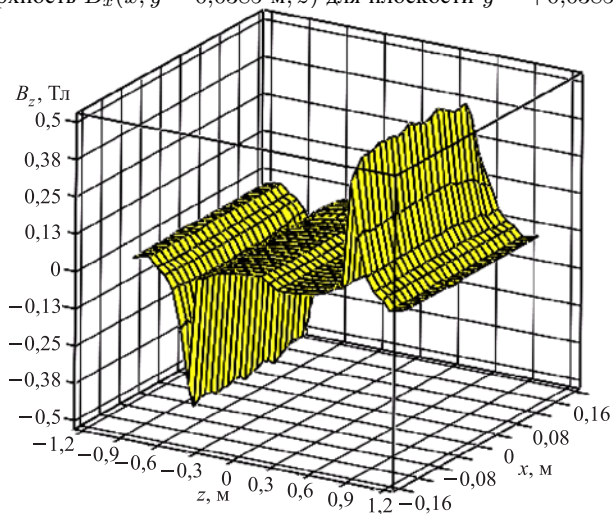


Рис. 9. Поверхность $B_z(x, y = 0,0385$ м, $z)$ для плоскости $y = +0,0385$ м. $I = 635$ А

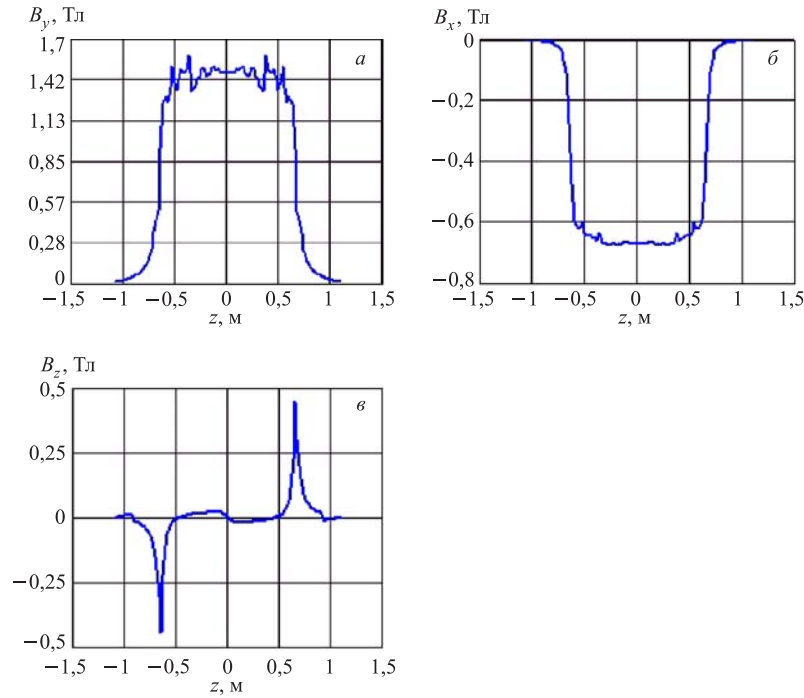


Рис. 10. Графики зависимости $B_y = B_y(x = -0,15, y = +0,0385, z)$ (а); $B_x = B_x(x = -0,15, y = +0,0385; z)$ (б); $B_z = B_z(x = -0,15, y = +0,0385, z)$ (в) от продольной координаты z

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: $(0, 0, z)$, $(0, 0, 0,0385 \text{ м}, z)$, $(0,12 \text{ м}, 0, z)$, $(0,12 \text{ м}, 0,0385 \text{ м}, z)$ для тока 240, 635 А и $(0, 0, z)$, $(0, 0, 0,0335 \text{ м}, z)$, $(0,12 \text{ м}, 0, z)$, $(0,12 \text{ м}, 0,0335 \text{ м}, z)$ 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 центральной по

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

$I, \text{ А}$	$B_c, \text{ Тл}$	$\Sigma, \text{ Тл} \cdot \text{ м}$	$L_{\text{eff}}, \text{ м}$
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

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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; 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 // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 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. Дубна, 2006. С. 118–129.
5. *Балдин А. А. и др.* Измерение объемной карты магнитного поля для магнитооптического спектрометра МАРУСЯ. Препринт ОИЯИ Р13-2006-67. Дубна, 2006.

Получено 30 апреля 2008 г.