

УДК 537.613 + 539.1.07 : 621.384.4

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АНАЛИЗИРУЮЩЕМ МАГНИТЕ СПЕКТРОМЕТРА NIS

*С. А. Авраменко, С. В. Афанасьев, И. Г. Волошина, С. А. Долгий,
А. Ю. Исупов, А. В. Калмыков, В. К. Маковеев, Г. П. Николаевский,
И. В. Островский, Е. Е. Перепелкин, В. Ф. Переседов, С. Н. Пляшкевич,
Н. С. Российская, Р. А. Салмин, В. К. Сподарец,
Е. А. Строковский, И. П. Юдин¹*

Объединенный институт ядерных исследований. Дубна

Основными целями эксперимента NIS (Nucleon Intrinsic Strangeness) являются: поиск эффектов скрытой поляризованной странности в нуклоне и поиск и изучение экзотических барионов (пентакварков) в NN -реакциях. Установка расположена в корпусе 205 Лаборатории высоких энергий ОИЯИ на канале 4В выведенного из ускорителя «Нуклотрон» пучка с кинетической энергией от 1 до 4 ГэВ. Электромагнит ИСП-40-4В спектрометра имеет внешние размеры $3,20 \times 3,26 \times 4,48$ м и апертуру $2,74 \times 0,68$ м. Измерение магнитного поля осуществлялось трехкомпонентным холловским магнитометром в автоматизированном режиме с управлением от компьютера. Рабочая область измерений составила $1,03 \times 0,60 \times 3,92$ м. В работе дается описание измерительной аппаратуры, процедуры измерений, результаты которых используются для проведения компьютерного моделирования методом Монте-Карло эксперимента и в дальнейшем, после проведения сеансов набора физических данных, будут использованы в их анализе.

The main goals of NIS (Nucleon Intrinsic Strangeness) experiment are the search of effects of hidden intrinsic polarized strangeness in nucleon and the search and study of exotic baryons (pentaquarks) in NN reactions. The experiment will be performed at the JINR Nuclotron (Laboratory of High Energies) on the extracted beam with kinetic energy from 1 up to 4 GeV. The electromagnet ISP-40-4V of the spectrometer has the external sizes $3.20 \times 3.26 \times 4.48$ m with aperture of 2.74×0.68 m. Measurement of the magnetic field was carried out with the use of a three-component Hall probe in the online mode. The measured field volume is of $1.03 \times 0.60 \times 3.92$ m. The description of the measuring equipment and procedure of measurements are presented. Results of the measurements are given. The results are being used for the Monte-Carlo simulation of the experiment and will be used for analysis of the physical data.

ВВЕДЕНИЕ

Основными целями эксперимента NIS (Nucleon Intrinsic Strangeness) являются: 1) поиск эффектов скрытой поляризованной странности в нуклоне и 2) поиск и изучение экзотических барионов (пентакварков) в NN -реакциях. Для поиска эффектов скрытой поляризованной странности планируется [1, 2] выполнить измерения сечений рождения φ - и ω -мезонов вблизи порогов.

¹E-mail: yudin@jinr.ru

Установка NIS расположена в корпусе 205 Лаборатории высоких энергий ОИЯИ на канале 4В выведенного из ускорителя «Нуклотрон» пучка с кинетической энергией в интервале 1–4 ГэВ. В качестве анализирующего магнита используется спектрометрический магнит 1СП-40-4В с межполюсным зазором 0,68 м (по вертикали, координата y). Электромагнит 1СП-40-48 спектрометра имеет внешние размеры $3,20 \times 3,26 \times 4,48$ м и апертуру $2,74 \times 0,68$ м.

На рис. 1, *a, б* приведена схема установки. Ось Z системы координат направлена в сторону движения частиц первичного пучка, параллельно плоскости нижнего полюсного

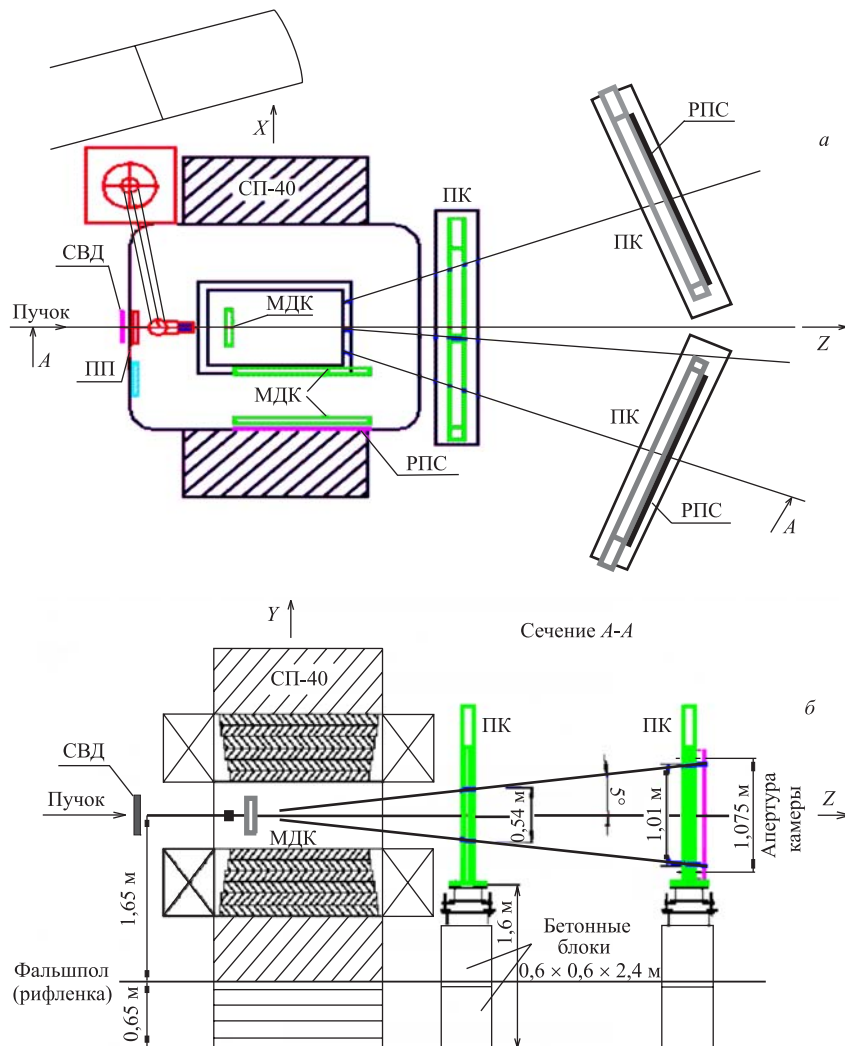


Рис. 1. Схема установки НИС: *a*) горизонтальная ZOX -плоскость. Т — жидководородная мишень; ПК — пропорциональная камера; МДК — мини-дрейфовая камера; РПС — резистивные плоские счетчики; СВД — сцинтилляционный волоконный датчик; ПП — профилометр пучка; СП-40 — анализирующий магнит; *б*) вертикальный разрез, ZOY -плоскость

наконечника. Ось Y направлена вертикально «вверх» по нормали к плоскости этого же полюсного наконечника. Ось X направлена так, чтобы получилась правая система координат. Центр спектрометрического магнита 1СП-40-4В принимается за начало декартовой системы координат («правой» тройки XYZ) спектрометра. При этом центр нижнего полюсного наконечника имеет координату ($x = 0, y = -0,34 \text{ м}, z = 0$).

В процедуре восстановления импульса будет использоваться информация от координатных детекторов, расположенных сразу за мишенью (в магнитном поле) и на выходе из магнита 1СП-40-4В. Для регистрации частиц с импульсами в диапазоне 0,7–2,5 ГэВ/с будут использованы 2×1 -м пропорциональные камеры (ПК) и резистивные плоские счетчики (РПС). Для изучения «мягких» частиц с импульсами $\sim 0,3$ –0,9 ГэВ/с будут использованы мини-дрейфовые камеры (МДК).

Измерение магнитного поля осуществлялось трехкомпонентным холловским магнитометром в автоматизированном режиме с управлением от компьютера. Рабочая область измерений составила $1,03 \times 0,60 \times 3,92 \text{ м}$. В работе дается описание измерительной аппаратуры и процедуры измерений. Приведены результаты измерений. Описываемые ниже измерения пространственного распределения трех компонент магнитного поля магнита 1СП-40-4В проведены с целью получения информации о величине и однородности магнитного поля и построения рабочей карты поля для различных режимов работы спектрометра. Полученные результаты используются для проведения компьютерного моделирования эксперимента, и в дальнейшем, после проведения сеансов набора физических данных, будут использованы при обработке этих данных.

1. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ КАРТЫ ПОЛЯ МАГНИТА 1СП-40-4В

Измерение магнитного поля осуществлялось трехканальным холловским магнитометром (МЗХ) [3] в автоматизированном режиме с управлением от компьютера. Шаг измерений выбирался исходя из характеристик расчетного распределения поля [4]. Блок-схема измерительного комплекса измерения магнитного поля установки NIS представлена на рис. 2.

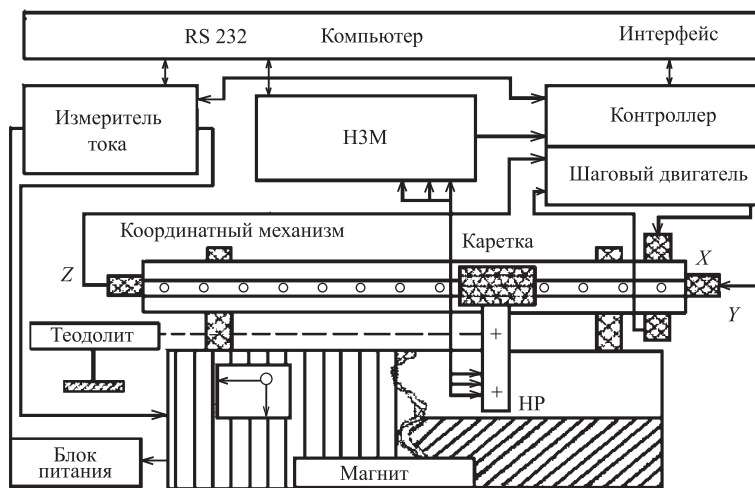


Рис. 2. Блок-схема измерения магнитного поля

Магнитометрическая аппаратура позволяла одновременно измерять положительные проекции в выбранной системе координат (XYZ) вектора магнитного поля в заданной точке с помощью трех независимых измерительных каналов. Основная измерительная аппаратура располагалась непосредственно возле магнита в экспериментальной зоне канала 4В. Пробники с датчиками Холла (ДХ) размещались в специальной головке и шестиметровым кабелем соединялись с входом аппаратуры. Выход измерительной аппаратуры соединялся двухметровым кабелем с персональным компьютером, расположенным рядом с электронным блоком измерительной аппаратуры. Данные о напряжениях с датчиков Холла переводились в величины магнитной индукции и записывались на магнитный диск компьютера. Магнитометр был прокалиброван методом ЯМР в стационарном режиме и позволял измерять магнитные поля в диапазоне от 0 до 2 Тл (разделенные на три поддиапазона) с максимально возможной чувствительностью не хуже 1 Гс (в стационарном режиме). Данные о величине магнитного поля фиксировались мониторным датчиком Холла ДХ-10, расположенным в правом дальнем (от измерительной аппаратуры) углу нижнего полюса магнита. Эти данные вручную записывались с показаний вольтметра два раза в один проход: первый раз — в момент начала движения датчика против оси Z и второй раз — в конце обратного (или «возвратного») движения (по оси Z). После завершения измерений карты поля при одном токе записанные данные с мониторного датчика служили поправочными коэффициентами измеренным данным для каждого прохода.

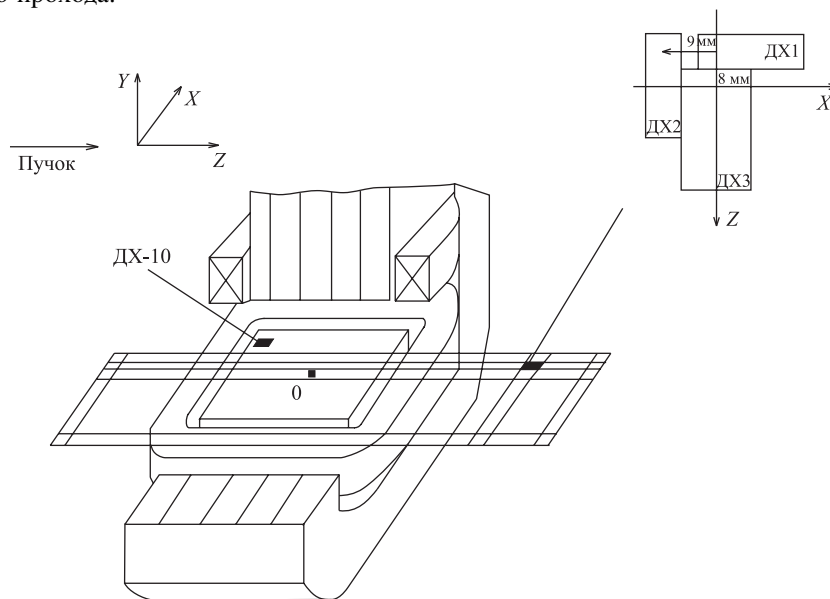


Рис. 3. Схема координатно-измерительного устройства

Перемещение головки с тремя пробниками осуществлялось с помощью специального координатного механизма (рис. 3). На четырех стационарных опорах вне магнита закреплялась дюралюминиевая рама длиной 5 м и шириной 1,26 м, которая могла перемещаться по высоте (y) на 0,6 м. По этой раме передвигалась на роликах штанга, на которой находилась головка (каретка) с тремя пробниками. Каретка устанавливалась на штанге в

диапазоне от $x = +0,03$ м до $x = -1,00$ м. Привязка рамы координатно-измерительного устройства (и, соответственно, датчика) к измеряемому объему осуществлялась с погрешностью не хуже 1 мм.

В продольно-горизонтальном направлении позиционирование датчика осуществлялось протяжкой каретки координатного устройства по раме с постоянной скоростью при помощи электропривода. Измерения величины магнитного поля в каждой точке производились двукратно — при прямом и обратном ходе каретки. Время измерений для одного прохода каретки туда и обратно было от 5 до 7 мин.

По длине рамы над кареткой натягивалась масштабная латунная лента с отперфорированными в ней с шагом 1 см щелями размером 0,5 мм. Отметим, что для данного эксперимента использовался шаг 2 см. Лента пропусклась в зазор закрепленной на каретке фотосчитывающей головки, сигналы от которой служили метками продольной координаты (z) и использовались для организации триггера измерений.

Расположение области измерений и измерительной системы (рамы) относительно полюса магнита показано на рис. 4.

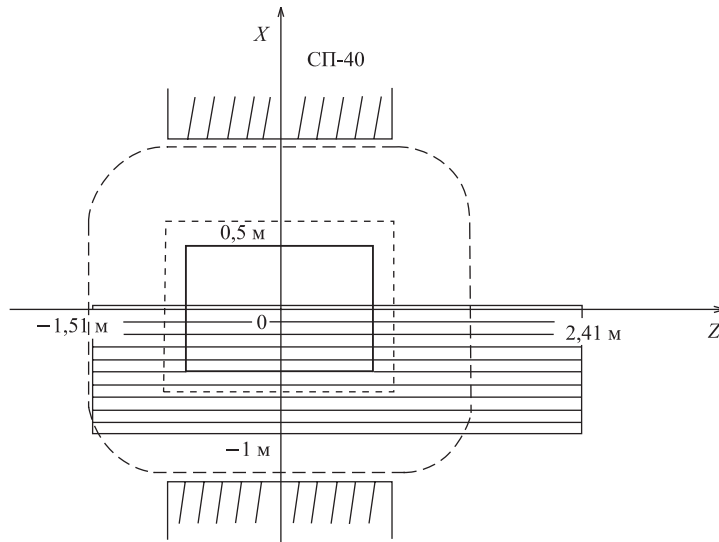


Рис. 4. Измерительная система (рама) и система координат, в которой проводились измерения относительно полюса магнита

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

Значения электродвижущей силы (напряжения) U преобразователей Холла связаны с магнитной индукцией B [Гс] соотношением B [Гс] = $1000 \cdot U$ [мВ] / γ [мкВ/Гс]. Для датчика основной, y -компоненты магнитного поля ДХ3, значение $\gamma = 8,4$ мкВ/Гс (для величин $B_y = 6000$ Гс). Мониторный датчик ДХ-10 имел чувствительность $\gamma = 9,6$ мкВ/Гс (для величин $B_y = 11000$ Гс).

Измерения проводились при трех различных значениях магнитного поля в магните 1СП-40-4В, токи в обмотке были $I = 1100, 745$ и 350 А. При всех значениях тока снималась карта поля в медианной плоскости (плоскость $P4$, $y = 0$), а также в плоскостях

$P1$ ($y = -0,3$ м), $P2$ ($y = -0,2$ м), $P3$ ($y = -0,1$ м), $P5$ ($y = +0,1$ м), $P6$ ($y = +0,2$ м) и $P7$ ($y = +0,3$ м). В плоскости ZOX измерялось 197×18 точек соответственно. Шаг перемещения каретки по Z был 2 см (в интервале от +2,41 до -1,51 м), по X шаг был 3, 5, и 10 см (в интервале от +0,03 до -1,00 м, см. таблицу).

Номер линии	Координата линии X , м	Номер линии	Координата линии X , м	Номер линии	Координата линии X , м
1	+0,03	7	-0,45	13	-0,75
2	0,00	8	-0,50	14	-0,80
3	-0,10	9	-0,55	15	-0,85
4	-0,20	10	-0,60	16	-0,90
5	-0,30	11	-0,65	17	-0,95
6	-0,40	12	-0,70	18	-1,00

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

Значения напряжений Холла и для прямого и для обратного движений датчика с помощью коэффициентов γ переводились (в режиме реального времени) в значения компонент B_x , B_y и B_z магнитной индукции и записывались в выходной файл.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 1СП-40-4В

Измерения проводились в объеме $1,03 \times 0,60 \times 3,92$ м (см. рис. 3) в 24822 точках магнита при значениях тока в витке обмотки 350, 745 и 1100 А.

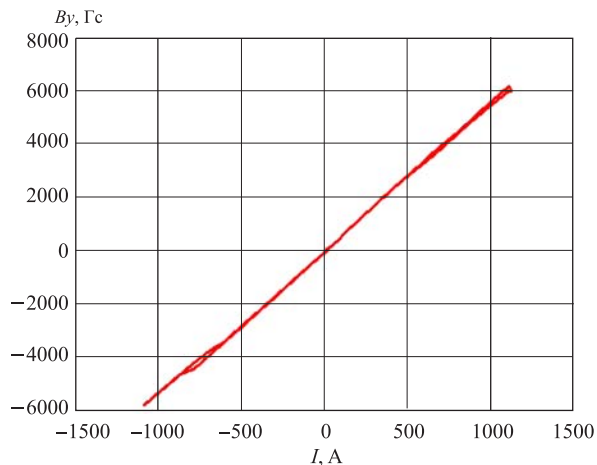


Рис. 5. Кривая возбуждения $B = B(I)$ для магнита 1СП-40-4В

На рис. 5 приведена полученная кривая возбуждения $B = B(I)$ для точки с $x = y = z = 0$. Ток поднимался от 0 до номинального значения +1100 А, после чего уменьшался до 0 и далее с противоположным знаком достигал значения -1100 А и затем снова устремлялся к 0. Наблюдаемые «петли» на графике связаны с погрешностями в установке токов питания магнита.

На рис. 6 приведен график измеренных значений $B_y(x, y, z)$ одного выбранного прохода (с $x = 0$, $y = -0,3$ м) для прямого (номера точек с $N_p = 1$ до $N_p = 197$) и обратного (номера точек с $N_p = 198$ до $N_p = 394$) движения датчика Холла. Анализ измеренных данных показывает, что эти данные для прямого и обратного движения систематически различаются, особенно на участках неоднородного поля, а именно, вблизи границ (ребер) полюсов. Это вызвано характером поведения силовых линий поля на ребрах полюса. По этой причине необходимо провести усреднение для значений компонент в точке (x, y, z) , полученных для прямого ($z + \Delta z$, где Δz — приращение координаты z , которое зависит от скорости v движения датчика и от времени Δt , за которое производится данное, единичное измерение) и обратного ($z - \Delta z$) движений: $\overline{B}_y(x, y, z) = [B_y(x, y, z + \Delta z) + B_y(x, y, z - \Delta z)]/2$. То же самое относится к другим компонентам поля: $B_x(x, y, z)$ и $B_z(x, y, z)$. Именно эти усредненные значения мы приводим как окончательный результат измерений и опускаем в дальнейшем значок усреднения. Разности $f(z) = \overline{B}_y(x, y, z) - B_y(x, y, z + \Delta z)$ между усредненными и измеренными (например, для прямого движения датчика) значениями приведены на рис. 7 в зависимости от z -координаты при фиксированных значениях x и y . Выполненный анализ обработанных данных позволяет оценить ошибку измерений величиной $\Delta B/B = 0,5\%$ (30 Гс на уровне 6000 Гс) для области поля вблизи границ полюсов и $\Delta B/B = 0,1\%$ (6 Гс на уровне 6000 Гс) для остальной области измерений.

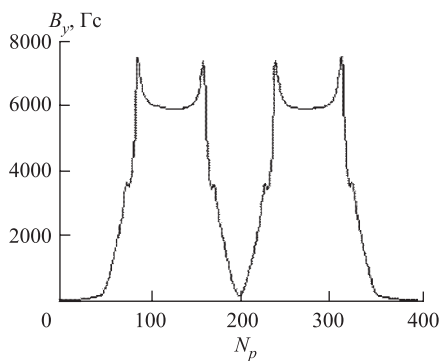


Рис. 6. Величина B_y вдоль продольной координаты z для прямого ($z + \Delta z$) и обратного ($z - \Delta z$) движения

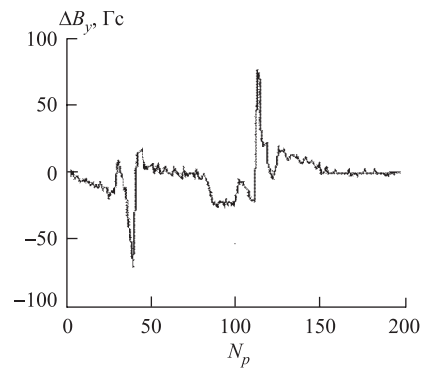


Рис. 7. График разности ΔB_y величин $\overline{B}_y(x, y, z)$ и $B_y(x, y, z + \Delta z)$ для осевой линии ($x = y = 0$)

Использованные аналого-цифровые преобразователи воспринимали только сигналы положительной полярности. Поэтому приходилось повторять процедуру измерений в случае изменения знака той или иной компоненты, меняя ориентацию датчиков. Окончательный результат составлялся из этих двух измерений.

Зависимость основной компоненты магнитной индукции $B_y(x, 0, 0)$ от продольной координаты z при фиксированных $x = 0$ и $y = 0$ показана на рис. 8 для всех трех значений тока в обмотке магнита. В центре координат, для тока 350 А, магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 2006$ Гс; при токе $I = 745$ А магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 4003$ Гс и для тока $I = 1100$ А магнитная индукция $B_y(0, 0, 0) = 5825$ Гс. При проходе по цен-

тральной линии ($x = y = 0$) значения измеренной на торцах магнита при токе $I = 1100$ А компоненты поля $B_y(0, 0, z = +2, 41 \text{ м}) = 28,2 \text{ Гс}$ и $B_y(0, 0, z = -1, 51 \text{ м}) = 627,2 \text{ Гс}$.

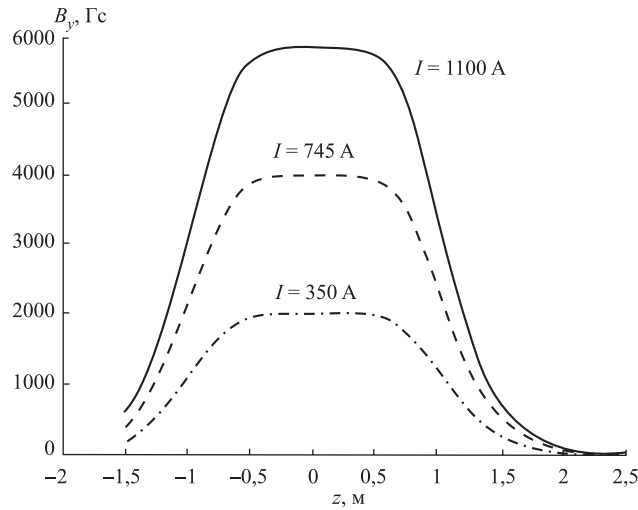


Рис. 8. Зависимость основной компоненты магнитной индукции $B_y(0, 0, z)$ от продольной координаты z при фиксированных x и y для трех значений тока в обмотке магнита

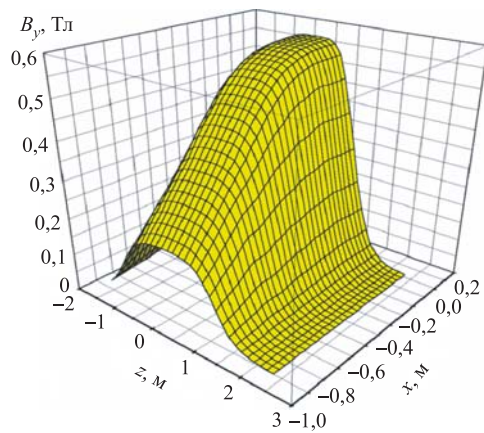


Рис. 9. Поверхность $B_y = B_y(x, y = 0, z)$ для медианной плоскости (плоскость P4, $y = 0$)

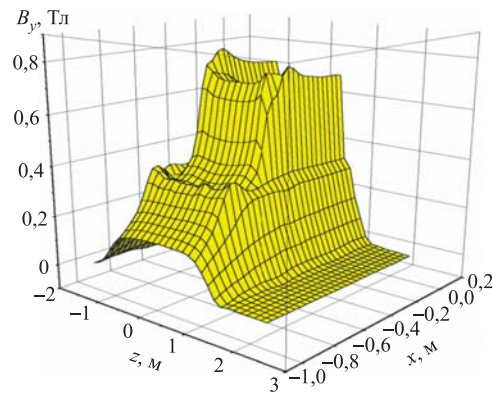


Рис. 10. Поверхность $B_y = B_y(x, y = -0,3 \text{ м}; z)$ для плоскости P1, $y = -0,3 \text{ м}$

В процессе эксперимента измерения будут выполняться при максимальном поле, когда ток возбуждения магнита $I = 1100$ А. Остановимся более подробно на результатах, полученных при этом токе. На рис. 9 приведено распределение компоненты B_y для медианной плоскости ($B_y(x, 0, z)$, плоскость P4, $y = 0$). Трехмерное распределение для компоненты B_y вблизи нижнего полюса ($B_y(x; -0,3 \text{ м}; z)$, плоскость P1, $y = -0,3 \text{ м}$) показано на рис. 10. Для медианной плоскости однородное поле сосредоточено в межполюсном пространстве (размеры полюса 1,0 м в поперечном направлении и 1,5 м вдоль

пучка). При приближении точки измерения к верхнему (или нижнему) полюсному наконечнику появляются всплески неоднородности поля вблизи его границ. На рис. 10 видно, что B_y достигает здесь ($y = -0,30$ м, вблизи границ наконечника) 0,8 Тл при токе $I = 1100$ А. Мониторный датчик, установленный непосредственно на железо нижнего наконечника ($y = -0,34$ м) вблизи его угла, при этом токе показывал 1,112 Тл, что соответствует значению 0,5825 Тл в центре магнита (см. рис. 7), т. е. в точке $x = y = z = 0$.

Графики распределения магнитного поля вблизи нижнего полюса (плоскость $P1$, $y = -0,3$ м) приведены для компоненты $B_x = B_x(x; y = -0,3 \text{ м}; z)$ на рис. 11 и для компоненты $B_z = B_z(x; y = -0,3 \text{ м}; z)$ на рис. 12.

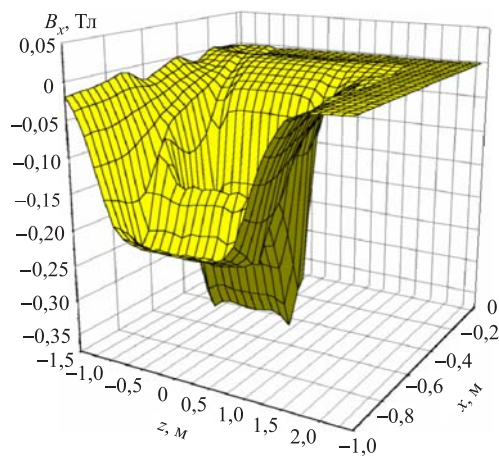


Рис. 11. Поверхность $B_x = B_x(x, y = -0,3 \text{ м}; z)$ для плоскости $P1$, $y = -0,3$ м

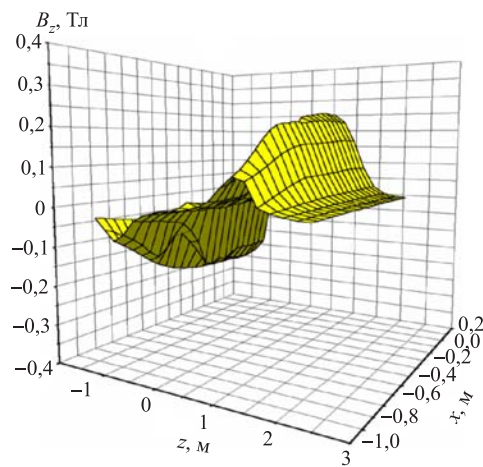


Рис. 12. Поверхность $B_z = B_z(x, y = -0,3 \text{ м}; z)$ для плоскости $P1$, $y = -0,3$ м

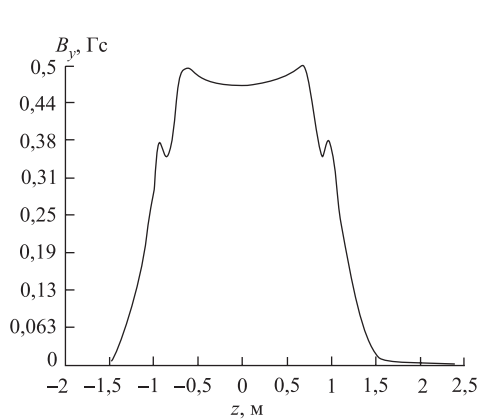


Рис. 13. График $B_y = B_y(x = -0,55 \text{ м}; y = -0,3 \text{ м}; z)$ в зависимости от продольной координаты z

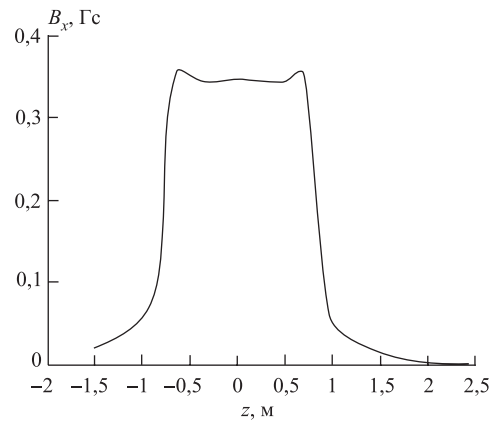


Рис. 14. График $B_x = B_x(x = -0,55 \text{ м}; y = -0,3 \text{ м}; z)$ в зависимости от продольной координаты z

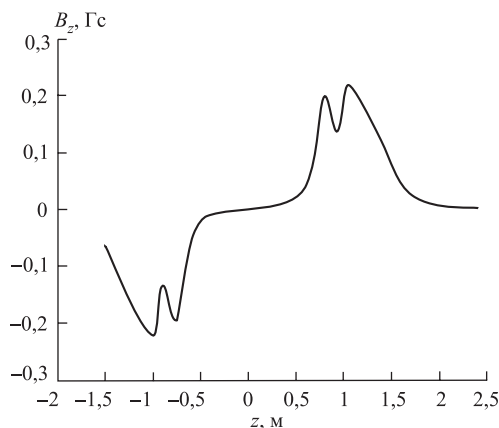


Рис. 15. График $B_z = B_z(x = -0,55 \text{ м}; y = -0,3 \text{ м}; z)$ в зависимости от продольной координаты z

Для линии с $x = -0,55 \text{ м}$ и $y = -0,3 \text{ м}$ на рис. 13–15 приведены одномерные характерные зависимости компонент B_y, B_x, B_z от продольной координаты z .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения магнитного поля анализирующего магнита 1СП-40-4В установки NIS в пространственном объеме с размерами $1,03 \times 0,60 \times 3,92 \text{ м}$. Составлена трехмерная карта распределения всех компонент вектора напряженности магнитного поля в этом объеме. Построены графики характерных распределений компонент поля на уровне 0,2; 0,4 и 0,6 Тл. Приведено описание измерительной аппаратуры и процедуры измерений.

Измерения выполнены с погрешностью в величине $\Delta B/B \leq 0,5\%$ ($\leq 30 \text{ Гс}$ на уровне 6000 Гс в центре магнита) для области поля вблизи границ полюсов и $\Delta B/B \leq 0,1\%$ (6 Гс на уровне 6000 Гс в центре магнита) для остальной области измерений.

Полученные результаты используются для проведения компьютерного методом Монте-Карло моделирования эксперимента и в последующем, после проведения сеансов набора физических данных, будут использованы при обработке полученных в его ходе данных.

Работа проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках грантов 02-02-16875 и 04-02-17104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strokovsky E. A. (NIS Collab.) // Book of Abstr. of the XVII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XVII), Dubna, Sept. 27 — Oct. 2, 2004. Dubna, 2004. P. 94.*
2. *Strokovsky E. A. (NIS Collab.) // Proc. of the 19th Eur. Conf. on Few-Body Problems in Physics, Groningen, The Netherlands, Aug. 23–27, 2004 / Ed. by N. Kalantar-Nayestanaki, R. G. E. Timmermans, B. L. G. Bakker. Melville; N. Y., 2005. V. 768. P. 237.*

3. *Алеев А. Н. и др.* Измерение поля спектрометрического магнита установки ЭКСЧАРМ. ОИЯИ, Р1-97-368. Дубна, 1997.
4. *Юдин И. П., Перепелкин Е. Е.* Графики расчетного трехмерного распределения поля спектрометрического магнита 1СП-40-4В для эксперимента NIS // XL Всеросс. конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии, Москва, 19–23 апреля 2004 г. (направлено).

Получено 12 августа 2005 г.