

ИСПЫТАНИЕ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*В. Б. Рева^{а, б, 1}, А. М. Батраков^а, М. И. Брызгунов^а, А. В. Бублей^а,
Р. В. Вахрушев^а, К. М. Горчаков^{а, б}, В. К. Гостеев^а, А. П. Денисов^а,
М. Н. Кондауров^а, В. М. Константинов^а, В. Я. Корчагин^а,
Н. С. Кремнев^а, В. М. Панасюк^а, В. В. Пархомчук^а,
С. П. Посполита^а, А. А. Путьмаков^а, К. С. Штро^{а, б}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Для достижения проектной светимости коллайдер NICA планируется оснастить стохастическим и электронным охлаждением. Система электронного охлаждения на энергию 2,5 МэВ состоит из двух охладителей, которые охлаждают оба ионных пучка одновременно. Описываются конструкция электронного охладителя и результаты испытаний его магнитных элементов в ИЯФ СО РАН.

In order to achieve the design luminosity in the NICA collider, the ring is planned to be equipped with stochastic and electron cooling. The 2.5-MeV electron cooling system consists of two coolers which cool both ion beams simultaneously. The design of the electron cooler and the results of testing of its magnetic elements at BINP SB RAS are described.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

КХД хорошо изучена в области высоких энергий. Но экспериментальные данные в области низких и средних энергий, важные для понимания внутренней структуры и динамики адронов, недостаточны, поэтому прецизионная спектроскопия этих диапазонов энергий является актуальной задачей. Желание иметь возможность проводить эксперименты с высококачественными пучками со средней энергией дало толчок к развитию проектов NICA (Россия), FAIR (Германия), NIAF (Китай). Для реализации физических экспериментов в области энергий до 4,5 ГэВ/нуклон требуется использование различных типов охлаждения (электронного и стохастического) с целью улучшения качества пучков заряженных частиц. Для этого комплекс NICA будет оснащен двумя системами охлаждения: стохастическим и электронным. Система электронного охлаждения (СЭО) должна обеспечить электронный пучок с энергией электронов до 2,5 МэВ и с постоянным током до 1 А.

¹E-mail: V.B.Reva@inp.nsk.su

1. КОНСТРУКЦИЯ СЭО

Система электронного охлаждения для коллайдера NICA состоит из двух, практически независимых, систем электронного охлаждения (рис. 1). Ближайшим аналогом СЭО NICA с точки зрения конструкции и заложенных физических принципов является электронное охлаждение для накопителя COSY на энергию до 2 МэВ [1]. Вся высоковольтная система каждого охладителя NICA расположена в отдельном баке с элегазом под давлением до 8 атм. Электронный пучок рождается в пушке, расположенной в баке, и ускоряется в электростатической трубке до требуемой энергии. По транспортному каналу пучок попадает в секцию охлаждения, где взаимодействует с ионами. Далее по другому транспортному каналу пучок попадает обратно в бак, где замедляется во второй электростатической трубке и поглощается на стенках электронного коллектора. На всем пути от пушки до коллектора электроны движутся в продольном магнитном поле для обеспечения поперечной фокусировки. В установках электронного охлаждения на среднюю и низкую энергию, использующих сильное продольное магнитное поле, траектории электронов привязаны к силовым линиям поля, и можно говорить о «замагниченности» движения, когда большое значение поперечного импульса частиц слабо сказывается на их траектории. С увеличением энергии электронов ситуация существенно меняется, поэтому любая неоднородность продольного магнитного поля вносит возмущение в траекторию электронного пучка, приводя к возбуждению ларморовского вращения, что может уменьшить скорость охлаждения. Несмотря на наличие специальных корректоров для его компенсации, необходимость в получении первичной оптики электронного пучка, приводящей к минимальному ларморовскому вращению, остается критически важной.

Для максимально эффективного использования участка, выделенного для СЭО коллайдера NICA, секции охлаждения обоих охладителей расположены одна над другой и имеют одинаковую длину. Электронные пучки в них, как и ионные, будут двигаться в противоположные стороны.

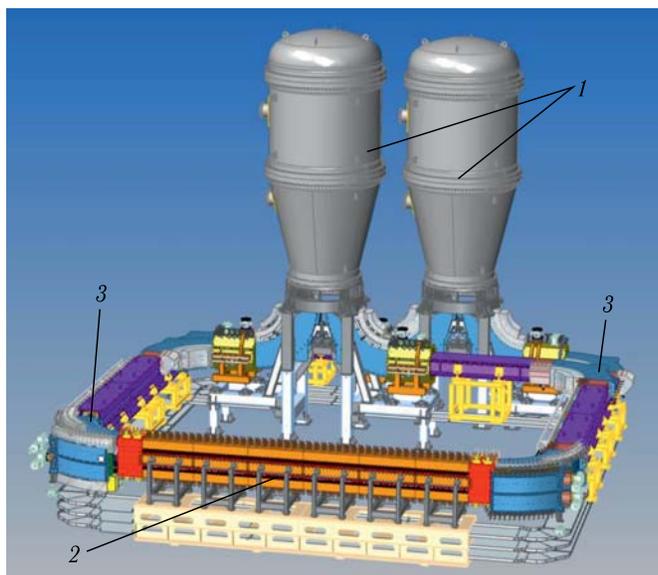


Рис. 1. Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA: 1 — бак высоковольтной системы; 2 — секция охлаждения; 3 — транспортные каналы

На рис. 2 показаны примеры реализации основных магнитных элементов для транспортировки электронного пучка. Особенно сложные условия налагаются на участок совмещения ионного и протонного пучков. Здесь необходимо обеспечить такой профиль изменения продольного магнитного поля с величины ~ 2 кГс в секции охлаждения (рис. 2, а, 1) до ~ 1 кГс в тороидальном участке (рис. 2, а, 3), который бы минимально возмущал поперечное движение электронов. Для этого служит согласующая секция (рис. 2, а, 2), где продольное положение катушек подобрано по результатам магнитного моделирования. Катушки тороидальной секции имеют разный размер, чтобы обеспечить совмещение каналов транспортировки ионного и электронного пучков.

Переход между прямолинейным участком транспортного канала (рис. 2, а, 5) и тороидальным участком также выполнен с помощью специализированной секции вставки (рис. 2, а, 4). Несмотря на то, что здесь значение продольного магнитного поля одинаково, катушки секции вставки имеют минимальную длину. Тогда за счет их сдвига в продольном направлении возможно обеспечить место для технологической сборки вакуумной камеры, размещения выводов пикапов и коротких корректирующих катушек для уменьшения циклотронного вращения электронного пучка. Величина продольного поля подобрана для реализации замагниченного охлаждения и оптики электронного пучка. При этом необходим разумный компромисс между энергопотреблением и достижимой величиной магнитного поля, поэтому величина магнитного поля в транспортных каналах уменьшена по сравнению с секцией охлаждения для достижения энергопотребления установки в 500–700 кВт [2].

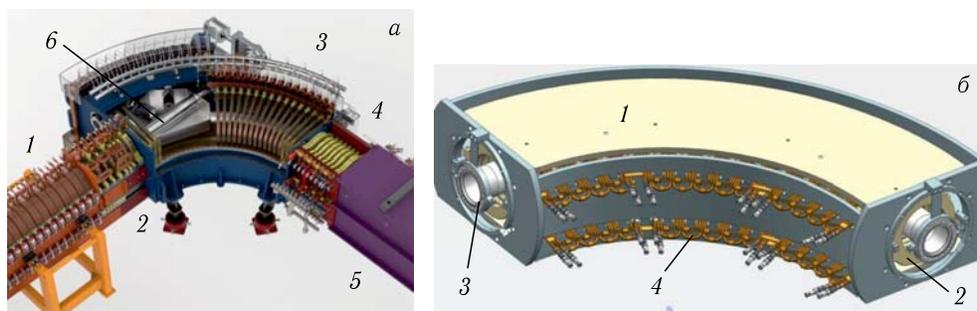


Рис. 2. а) Трехмерная модель участка совмещения ионного и протонного пучков в СЭО коллайдера NICA: 1 — секция охлаждения; 2 — согласующая секция; 3 — тороидальный участок; 4 — секция вставки; 5 — прямолинейный участок транспортного канала; 6 — вакуумная камера. б) Трехмерная модель поворотного магнита: 1 — катушка поворотного (вертикального) поля; 2 — катушка продольного поля; 3 — вакуумная камера; 4 — выводы катушек продольного поля

2. СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для сравнения результатов расчетов магнитных полей с помощью специализированной программы MAG3D и результатов измерений использовался набор элементарных направляющих, состоящий из прямолинейных отрезков различной длины и поворота на 90° по радиусу 100 см. С их помощью возможно измерение практически

любых наборов магнитных элементов (рис. 3). При этом предпочтительными являются измерения в составе триады, когда к основному элементу присоединяются два смежных для более корректного измерения краевых эффектов магнитного поля. На рис. 4 — фото системы магнитных элементов для измерения поворотного магнита.

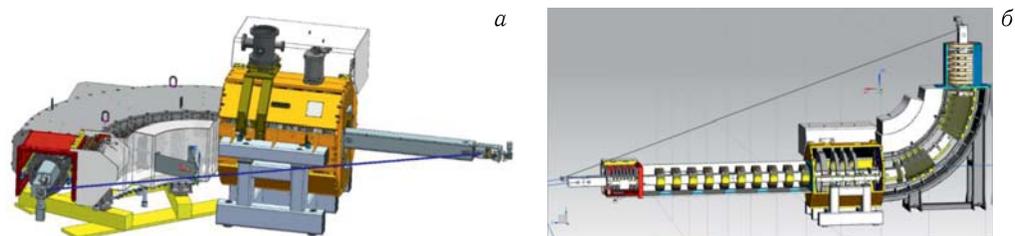


Рис. 3. 3D-модель системы магнитных измерений в поворотном магните в комбинации со смежными элементами (а) и максимально возможный набор магнитных элементов для измерения в составе единой конструкции (б)



Рис. 4. Система магнитных измерений в поворотном магните

Для перемещения датчика магнитного поля использовался гибкий зубчатый одно-сторонний ремень Elatech полиуретановый, тип М (открытый) с кордом из материала арамид. Профиль Т5 (шаг 5 мм), ширина 10 мм.

Держатель датчика магнитного поля был установлен на подвижной каретке, которая могла перемещаться вдоль магнитных элементов. Положение каретки вдоль направляющих использовалось как продольная координата.

2.1. Трехкоординатный датчик магнитного поля. Системы электронного охлаждения имеют высокие требования к поперечным компонентам соленоидального магнитного поля. Для качественного охлаждения ионных пучков необходимо иметь в секции охлаждения поперечные компоненты (B_x , B_y) на уровне 10^{-5} относительно продольной компоненты магнитного поля B_z [3, 4]. Так как продольное поле секции охлаждения имеет величину ~ 2 кГс, то порядок величины поперечных компонент, которые необходимо измерить, составляет от 0,01 до 0,1 Гс. Для определения компонент настолько малой величины в ИЯФ СО РАН была специально разработана система «Компас» [4]. Эта система с помощью четырехквadrантного фотодиода измеряет

отклонение лазерного луча, отраженного от зеркала, чувствительного к поперечным компонентам поля. Однако подобные сверхчувствительные системы малоприменимы для магнитных полей порядка 10 Гс. Поэтому для измерения параметров поперечных компонент магнитных полей в секции охлаждения и в транспортных каналах требуются и «грубые» измерения с помощью датчиков Холла в диапазоне 0,1–10 Гс.

Для этого в ИЯФ многие годы применяется система, состоящая из следующих модулей электроники, установленных в крейте VME: это контроллер BIVME-1, интерфейс VME RS-232, аналоговый интерфейс датчиков Холла VMEHSI с 32-канальным мультиплексором и усилителем, а также прецизионный АЦП VMEADC [5]. Для перемещения каретки с шагом 0,5–10 мм вдоль магнитного устройства используется шаговый двигатель с управлением посредством интерфейса RS-232. Координата каретки в магнитном устройстве определяется по количеству сделанных шагов. После окончания измерения каретка с датчиком в непрерывном режиме возвращается назад на 10 мм дальше исходной позиции, после чего совершает перемещение вперед на те же 10 мм, компенсируя механический гистерезис подвижки. Вследствие этого удается добиться повторяемости проездов на уровне ± 50 –80 мкм. Усиленные сигналы датчика Холла с аналогового интерфейса передаются на 24-разрядный АЦП, способный производить измерения с разрешающей способностью 0,1 Гс (определяемой, в основном, собственными шумами системы) и точностью не хуже, чем $2 \cdot 10^{-5}$ от полного диапазона измерений (которая определяется температурной стабильностью электроники).

В качестве 3D- (трехкоординатного) датчика Холла использовалась микросхема компании Metrolab — MV2. Сам датчик выполнен по интегральной технологии и помимо холловского преобразователя также содержит стабилизированный источник питания и программируемый усилитель, позволяющий работать в нескольких диапазонах магнитных полей. Штатная чувствительность датчика в интересующем нас диапазоне (± 3 кГс) составляет 0,7 мВ/Гс для оси Z и 0,65 мВ/Гс для оси X и Y, с линейностью 0,2% шкалы и стабильностью порядка 250 ppm/K [6]. Однако стоит отметить, что производитель 3D-датчика не специфицирует ортогональность его магнитных осей.

Измерение чувствительности и неортогональности проводилось с помощью «калибровочного кубика» из немагнитного алюминиевого сплава, с тремя ортогональными гранями с отклонением не более 10 мкм на базе 50 мм. На одну из граней кубика монтировался носитель платы, имеющий форму уголка, на который устанавливалась плата с 3D-датчиком (рис. 5). Впоследствии уголок с платой закреплялся в каретке. Установка носителя на калибровочный кубик позволяла измерить полную неортогональность комбинации «датчик + плата + носитель», отказавшись от промежуточных отдельных измерений.

В процессе калибровки данная сборка помещалась в дипольный магнит с однородным магнитным полем, величина которого определялась с помощью прецизионного ЯМР-магнетометра, имеющего погрешность измерения порядка 2 ppm [7]. Калибровочная сборка устанавливалась на одну из плоскостей кубика на полюсе магнита, поле в котором перпендикулярно полюсу и, соответственно, плоскости калибровочного кубика. Для определения чувствительности и неортогональности поле измерялось в 18 точках в диапазоне ± 3 кГс. Далее кубик поочередно устанавливался на две другие плоскости, и процедура повторялась.

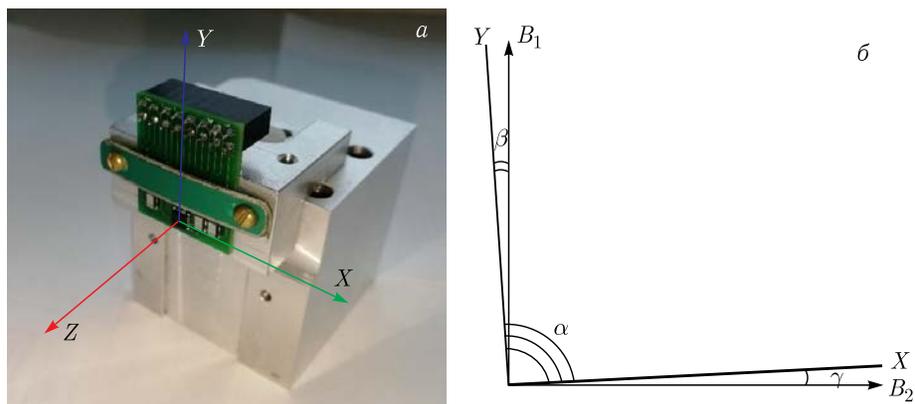


Рис. 5. а) Калибровочный кубик с установленным набором «датчик + плата + носитель» без кабеля линии связи между платой и измерительной электроникой. б) Схема определения углов, характеризующих неортогональности датчиков Холла

Определение собственной неортогональности осей трехмерного датчика MV2 может сводиться либо к решению трех двумерных задач (см. рис. 5), либо построению матрицы преобразования, диагонализующей экспериментально измеренные значения к ортогональным осям, выбранным за базис. Для плоскости XU углы составили величину $\beta = 0,008$ рад, $\gamma = 0,006$ рад. При измерении полей соленоидов охлаждения и транспортных каналов СЭО NICA большое влияние на малые величины поперечных компонент магнитного поля (B_x и B_y) может оказать большая продольная компонента поля B_z , поэтому для анализа результатов необходимо знать угол γ для систем координат ZX (0,025 рад) и ZY (0,007 рад).

2.2. Результаты измерений продольного поля трехкомпонентным датчиком.

Результаты измерений продольного поля для нескольких поворотных магнитов показаны на рис. 6, 7. В наших измерениях направление X датчика было ориентировано вдоль вертикального направления поворотного магнита, а Y — вдоль радиального. Продольное направление соответствовало оси Z трехкомпонентного датчика. Видно, что при величине продольного поля 1 кГс (см. рис. 6) вертикальная компонента

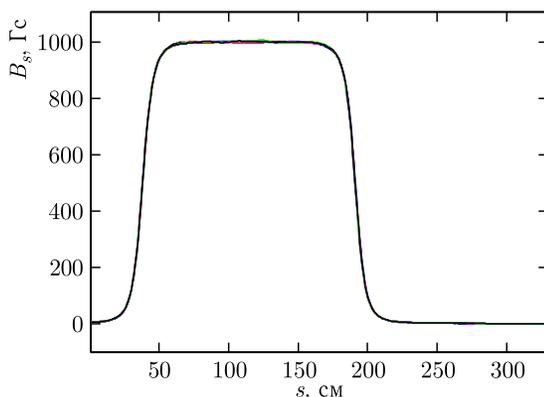


Рис. 6. Продольное магнитное поле в поворотном магните при токе $J_{sbend} = 195$ А

в магните составляет величину $B_v = 20$ Гс, а радиальная — $B_r = 40$ Гс (см. рис. 7). Радиальная компонента может быть объяснена смещением центра датчика магнитного поля относительно колес каретки, обеспечивающих перемещение датчика вдоль направляющих (рис. 8). Датчик поля идет практически над самыми передними колесами тележки, поэтому он с хорошей точностью описывает траекторию: линия-дуга-линия, но при этом на дуге оказывается наклоненным в радиально-продольной плоскости на угол $0,04$ рад. Вертикальная компонента магнитного поля появляется в силу неортогональности соответствующих датчиков Холла (см. п. 2.1).

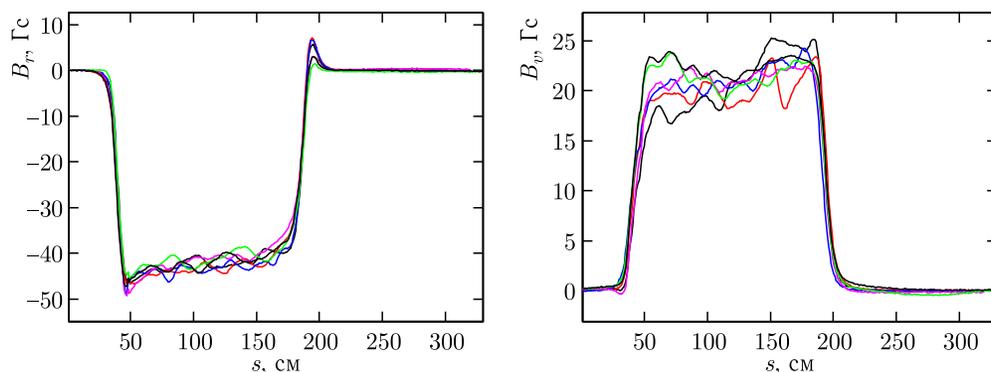


Рис. 7. Поперечные компоненты магнитного поля в поворотном магните при токе $J_{sbend} = 195$ А. Ток в катушке вертикального поля равен нулю

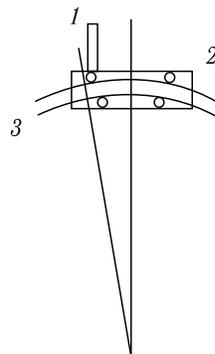


Рис. 8. Эскиз, поясняющий появление угла между продольной и радиальной компонентами магнитного поля, вызванными нецентральным расположением датчика Холла. 1 — датчик магнитного поля вместе с платой; 2 — каретка для перемещения датчика; 3 — криволинейная направляющая

После устранения вышеуказанной связи между компонентами магнитного поля появилась возможность сравнить компоненты магнитного поля с результатами моделирования. На рис. 9 показаны экспериментальное и расчетное значения радиального и вертикального магнитных полей, а также разность между экспериментом и расчетами для продольной компоненты. Видно достаточно хорошее соответствие между ними. При этом в данной конструкции геометрия магнитопровода не является определяющим фактором для формирования магнитного поля, а в катушках продольного поля возможны неопределенности, связанные с коммутационными выводами и положением медных проводников относительно измерительных плоскостей и внешнего корпуса катушек.

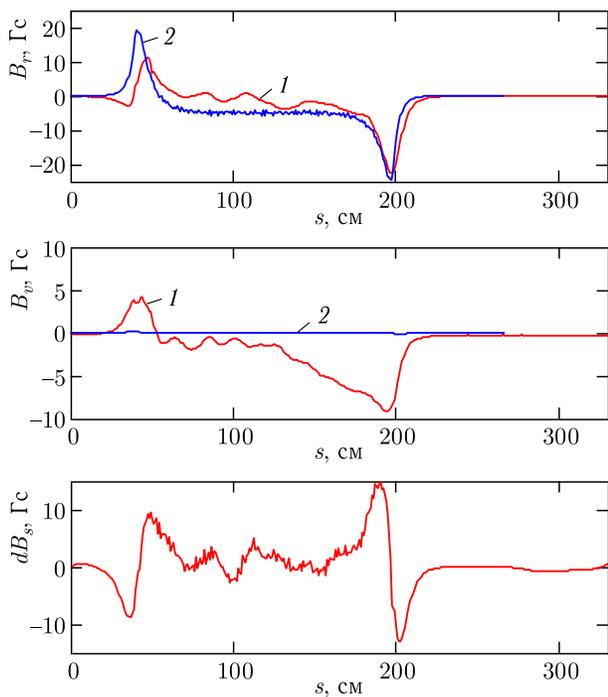


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Сравнение экспериментальных (красная кривая, 1) и расчетных данных (синяя кривая, 2) при включении продольного магнитного поля 1 кГс в поворотных магнитах

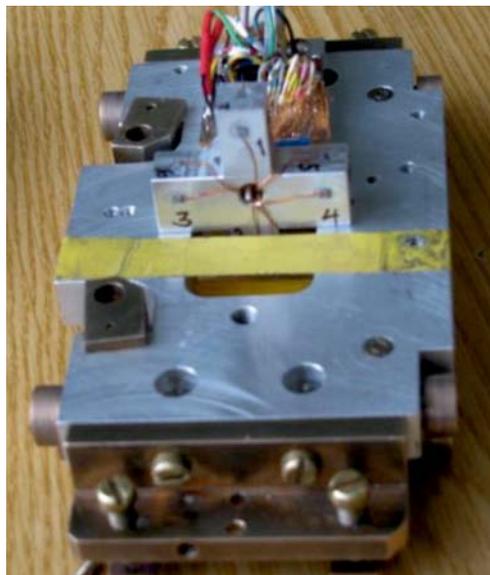


Рис. 10. Крестообразный держатель датчиков Холла вместе с кареткой. Цифрами обозначены точки креста, в которых производится измерение компонент магнитного поля

2.3. Пространственный датчик на основе 12 датчиков Холла. Измерения, описанные в п. 2.2, позволяют измерить распределение магнитного поля только вдоль центральной линии поворотного магнита. Для магнитных измерений в некоторой области около нее использовался калиброванный набор из 12 датчиков Холла. Они были размещены на специальном крестообразном держателе таким образом, что из-

мерялись три компонента магнитного поля, и каждый компонент измерялся в четырех точках вокруг центральной линии соленоида. На рис. 10 показана конструкция крестообразного держателя вместе с кареткой. Расстояние между точками 1, 2 и 3, 4 равно 30 мм. Смещение датчиков Холла внутри одной пространственной точки — 5 мм. С помощью линейной аппроксимации все значения пересчитывались в поперечное положение 15 мм относительно центра крестообразного держателя и к одному продольному положению. Для уменьшения влияния углов между датчиками, возникающих из неточностей изготовления граней и погрешностей при приклеивании датчиков Холла к ним, была проведена процедура калибровки в магните по такой же методике, как и для трехкомпонентного датчика. Таким образом, получалась матрица преобразований измеренных значений магнитного поля к трем фиксированным ортогональным проекциям.

2.4. Результаты измерений поворотного поля вблизи оси поворотного магнита. Результаты измерений при токе в катушке поворотного поля $J_{sbend} = 270$ А показаны на рис. 11 и 12. Видно, что измеренные значения достаточно хорошо согласуются с результатами моделирования и в краевых областях выглядят даже более симметричными и правдоподобными в деталях. Последнее связано со сложностями моделирования сложных катушек в выбранном программном комплексе. На краю маг-

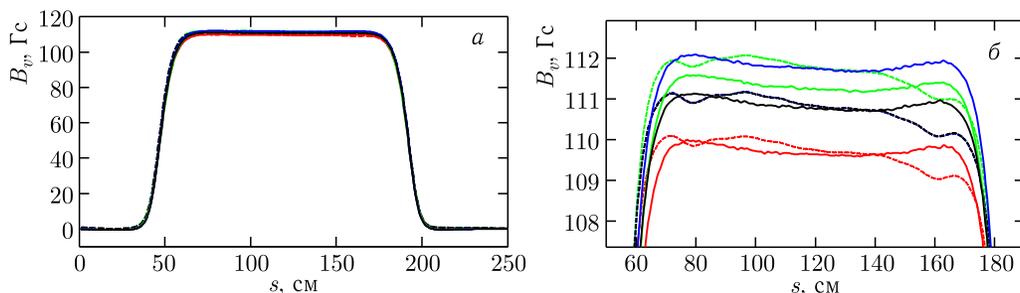


Рис. 11. Вертикальное магнитное поле в 90° -поворотном магните: а) его более детальное распределение в области его выхода на постоянное значение; сплошные кривые — экспериментально измеренные значения; штриховые — результаты моделирования

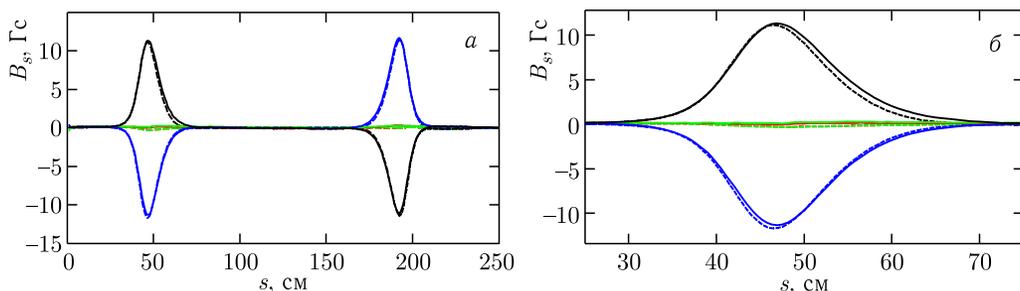


Рис. 12. Продольное магнитное поле в 90° -поворотном магните при включении поворотного поля: а) его более детальное распределение при входе (выходе) в поворот. Сплошные кривые — экспериментально измеренные значения; штриховые — результаты моделирования

нита хорошо видно продольное магнитное поле, возникающее выше и ниже плоскости поворота вследствие выполнения уравнений Максвелла (см. рис. 12). Симметричность этих значений позволяет судить, насколько точно мы проходим по магнитному центру нашего поворота, а также насколько точно он совпадает с центром конструкции нашего поворота, полученного при механической выставке системы измерений. Это необходимо контролировать, так как положение магнитопровода слабо связано с конфигурацией магнитного поля, а все определяется точностью расположения катушек поворотного и ведущего поля.

Пространственные измерения вертикального магнитного поля позволяют также оценить его показатель спада n , который можно определить как

$$b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{dB_r}{dv} + \frac{dB_v}{dr} \right), \quad n = -R \frac{b_1}{B_v},$$

где B_r и B_v — радиальная и вертикальная компоненты магнитного поля; R — радиус поворота; v — вертикальная координата. Здесь мы использовали равенство

$$\text{rot}(\mathbf{B}) = 0 \Rightarrow \frac{dB_r}{dv} = \frac{dB_v}{dr}$$

для увеличения экспериментальной точности определения этого параметра.

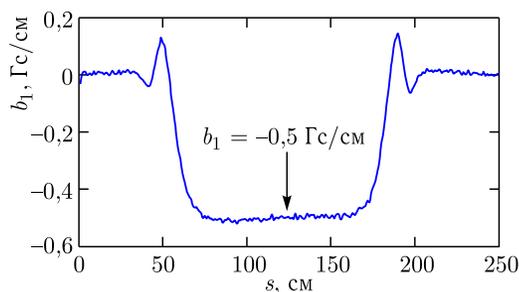


Рис. 13. Радиальный градиент поворотного магнитного поля. Величина поворотного поля $B_v = 110$ Гс, радиус поворота — 100 см

Из рис. 13 видно, что на всей длине магнита коэффициент $b_1 = 0,5$ Гс/см, а $n = 0,45$, что близко к предполагаемому значению $n = 0,5$ при проектировании данного элемента. Выбор этого значения обусловлен необходимостью сохранения формы пучка при его транспортировке в продольном магнитном поле. В противном случае пучок будет вытягиваться в поперечном направлении, приобретая эллиптическую форму, что может оказать негативное влияние на его рекуперацию и на эффективность процесса охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При реализации системы электронного охлаждения ускорительного комплекса NICA проведено подробное исследование качества магнитного поля в поворотных магнитах. Измерения выполнены как с помощью специализированного трехкоординатного датчика магнитного поля, позволяющего измерять три компоненты поля в одной

точке, так и с помощью набора датчиков магнитного поля в окрестности центральной линии. Показано, что результаты измерений с хорошей точностью совпадают с результатами расчетов. Для поворотного поля измеренный показатель спада поворотного поля 0,45 хорошо совпал с проектным значением 0,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reva V. B. et al.* COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // Proc. of the 5th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2014), Dresden, Germany, June 15–20, 2014. P. 777–779.
2. *Reva V. B., Bryzgunov M. I., Bublei A. V., Goncharov A. D., Kremnev N. S., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V., Polukhin V. A., Putmakov A. A.* High Voltage Cooler NICA Status and Ideas // Proc. of COOL2017, Bonn, Germany, Sept. 18–22, 2017. TUM21.
3. *Bocharov V. N., Bublei A. V., Konstantinov S. G., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V.* Precision Measurements and Compensation for the Transverse Components of the Solenoids' Magnetic Field // Instrum. Exp. Tech. 2005. V. 48, No. 6. P. 772–779.
4. *Bocharov V. N., Bryzgunov M. I., Bublei A. V., Cheskidov V. G., Fedotov M. G., Parkhomchuk V. V., Reva V. B.* System for Measurement of Magnetic Field Line Straightness in Solenoid of Electron Cooler for COSY // Proc. of COOL'11, Alushta, Ukraine, 2011. P. 107–110.
5. *Batrakov A., Zverev S., Ilyin I., Kozak V., Kuper E., Mamkin V., Ovchar V., Fatkin G., Tsukanov V., Vobly P., Volkov A.* The New VME-Based System for Magnetic Measurements with Hall Sensors. Preprint Budker INP 2007-32. Novosibirsk, 2007.
6. MV2: Справ. лист / MetroLab. [Web-документ]. <https://www.metrolab.com/wp-content/uploads/2020/06/MagVector-MV2-Datasheet-v2.5.pdf>.
7. *Karpov G. V., Medvedko A. S., Shubin E. I.* Precise Magnetometers on Base of Pulsed NMR Techniques // Proc. of the 20th Russ. Conf. on Charged Part. Accel. (RuPAC 2006), Novosibirsk, Russia, Sept. 10–14, 2006. P. 58–60.

Получено 18 ноября 2022 г.