

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВТСП-ЭКРАНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*А. Смирнов¹, Г. Дорофеев, В. Дробин,
Е. Куликов, Х. Малиновский*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проект NICA включает в себя систему электронного охлаждения пучков заряженных частиц до полной энергии ионов 4,5 ГэВ/нуклон. Для достижения необходимого времени охлаждения однородность магнитного поля в секции охлаждения должна быть по крайней мере 10^{-5} при длине соленоида системы охлаждения порядка 6 м. Однако стоимость такого соленоида очень высока из-за сложности сверхточной намотки. Использование сверхпроводящего экрана могло бы помочь решить эту проблему. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования прототипа экрана, изготовленного из высокотемпературных сверхпроводящих лент. Измерения выполнялись при различных квазистационарных эксплуатационных условиях. Сформулированы основные требования, предъявляемые к параметрам такого экрана и соленоида.

NICA project involves to use the electron cooling system of charged particles beams up to energy 4.5 GeV/u. For the achievement of the necessary cooling time the magnetic field homogeneity has to be at least 10^{-5} , with the length of the cooling system solenoid of about 6 m. However, it is very expensive due to the complexity of the precision winding. Applying of a superconductor shield could help to solve this problem. The experimental research of the shield made from high temperature superconductor tapes is presented in this paper. Measurements of the shield prototype were carried out under different quasi-stationary operating conditions. The requirements for the HTS shield and solenoid parameters are formulated.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Получение магнитного поля высокой однородности является основным требованием при создании системы электронного охлаждения пучков заряженных частиц коллайдера NICA [1, 2]. Перспективным направлением решения этой проблемы представляется создание высокооднородных полей с помощью незамкнутых сверхпроводящих экранов. В системе электронного охлаждения предполагается использовать экран, выполненный из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) второго поколения и охлаждаемый до рабочей температуры 77 К при помощи жидкого азота.

¹E-mail: smirnov@jinr.ru

Для исследования взаимодействия протяженного ВТСП-экрана с неоднородным магнитным полем был изготовлен прототип длиной 442 мм. В качестве базового элемента конструкции использовалась лента 2-G ВТСП (Y)BCO компании «SuperPower», шириной 12 мм и толщиной 50 мкм. Ее критический ток — до 340 А ($3 \cdot 10^6$ А/см²), поле полного намагничивания одной ленты порядка 250 Гс. С учетом особенностей сверхпроводящей керамики реализована долевая технология намотки экрана, когда ВТСП-лента укладывается вдоль образующей каркаса [3].

Специально для проведения экспериментов изготовлен стенд, включающий криостат, соленоид основного поля и систему регистрации магнитного поля с механизмом полуавтоматического перемещения датчиков Холла по длине экрана. Система регистрации позволяет фиксировать одновременно две компоненты поля: продольную B_z на оси магнитной системы и радиальную B_ρ на внутренней поверхности экрана.

В данной работе описана конструкция ВТСП-экрана, методика измерений. Эксперименты проводились при варьировании внешнего поля в соленоиде от 1 Гс до 1,3 кГс, сымитировано влияние неточной намотки соленоида на экран включением дополнительной катушки. Измерения осуществлены двумя способами, и выполнена оценка их точности.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Стенд (без криостата), на котором производились измерения, представлен на рис. 1. Соленоид основного поля длиной 492 мм и диаметром апертуры 68 мм навит из медного провода сечением $\phi 1,5$ мм на дюралевый каркас с внешним диаметром 80 мм. Поле в геометрическом центре соленоида $B_z(0) = 131$ Гс/1А.

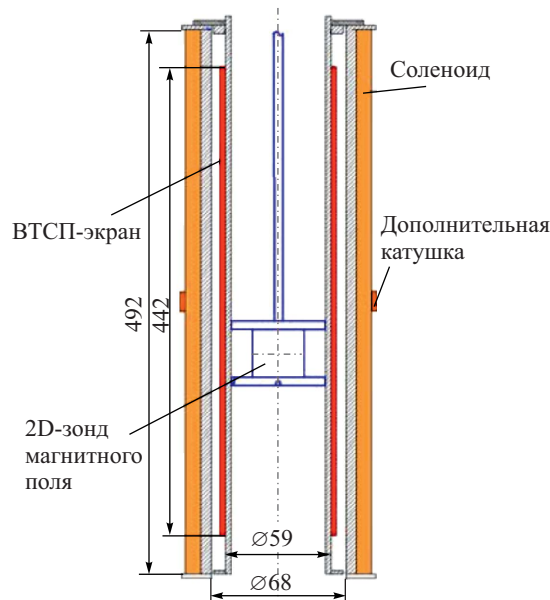


Рис. 1. Стенд для исследования ВТСП-экрана

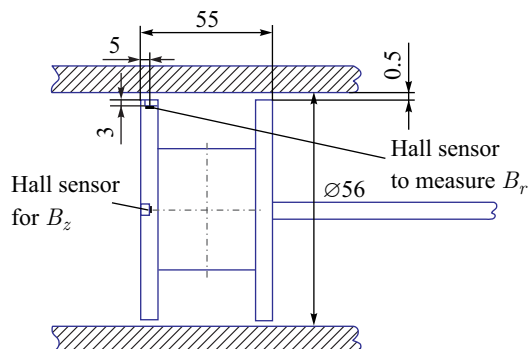


Рис. 2. Держатель 2D-зонда системы регистрации магнитных полей

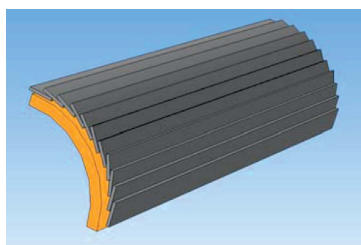


Рис. 3. «Черепичная» долевая намотка ВТСП-экрана

Для имитации точечных ошибок намотки соленоида или провалов поля между секциями соленоидов [1, 4] использовалась узкая дополнительная катушка, расположенная по центру на его поверхности. Катушка соосна с основным соленоидом и при 1 А создает продольное поле порядка 21,5 Гс.

Система измерения включает в себя зонд магнитного поля с двумя взаимно-перпендикулярными датчиками Холла ПХЭ-606817А, расположенными в специальном держателе (рис. 2), систему перемещения зонда, состоящую из шагового электродвигателя и аппаратуры управления двигателем, систему регистрации. Система регистрации представляет собой два прецизионных вольтметра Keythley 2000, на которые поступают аналоговые сигналы непосредственно с датчиков, и ПК, связанный с вольтметрами через интерфейс RS232. Магнитная система целиком находится в криостате и поддерживается при температуре жидкого азота.

Исследуемый экран представляет собой 490-мм трубу из немагнитной стали 12Х18Н9Т, внешним диаметром 59 мм, вдоль которой уложены сверхпроводящие ленты (Y)BCO внахлест, длиной 442 мм каждая (схематично намотка показана на рис. 3), в четыре слоя. Очередные слои накладывались со сдвигом кусков от слоя к слою, равным половине ширины ленты, образуя «черепицу». Сверху экран бандажирован тремя слоями стеклоткани.

Методика измерений заключается в охлаждении соленоида с экраном до 77 К в нулевом магнитном поле и последующем плавном подъеме тока в соленоиде до необходимого значения. Измерения проходят последовательно — с малых значений поля и до максимально возможных (в зависимости от задачи эксперимента). Шаг по продольной координате 10 мм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование краевых эффектов. Проведены первые оценочные измерения магнитных полей в экранируемой области в зависимости от величины поля основного соленоида. Две измеренные компоненты поля дают возможность определить угол наклона линий поля к продольной оси магнитной системы. Очевидно, этот угол дается выражением [5]

$$\theta \sim B_r/B_z. \quad (1)$$

Как видно из графиков (рис. 4 и 5), прототип экрана хорошо ослабляет радиальную составляющую в центральных областях и пропускает ее на краях, что согласуется с результатами, ранее полученными на малых ВТСП-экранах работы [3]. Четырехслойный экран данной конструкции стабильно сохраняет работоспособность в радиальном поле до 120 Гс при величине продольной компоненты B_z до 800 Гс.

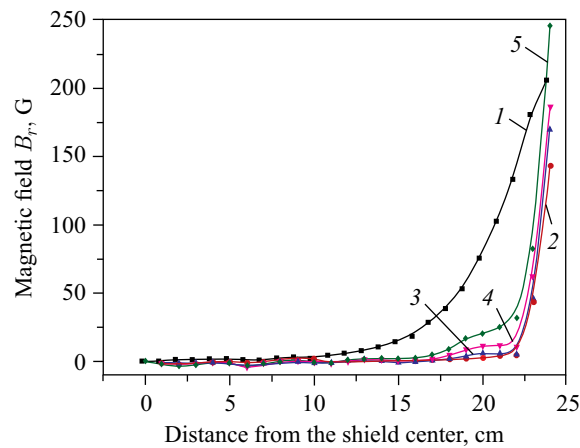


Рис. 4. Проникновение радиальной компоненты поля через ВТСП-экран при различных токах в соленоиде: 1 — без экрана при 10 А; с экраном при: 6 А (2); 7 А (3); 8 А (4); 10 А (5)

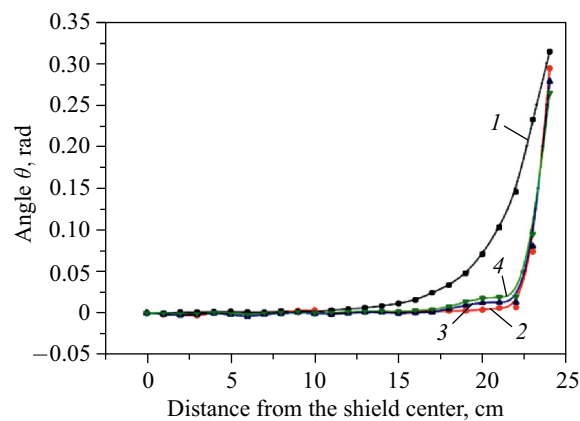


Рис. 5. Угол между силовыми линиями поля и продольной осью магнитной системы: 1 — без экрана при 10 А; с экраном при: 6 А (2); 8 А (3); 10 А (4)

Имитация ошибок намотки соленоида. Точечная ошибка намотки соленоида имитировалась включением дополнительной катушки. Величина коэффициента ошибки EF (Error Factor) пропорциональна отношению токов в катушке и соленоиде:

$$EF \sim I_{\text{кат}}/I_0, \quad (2)$$

где $I_{\text{кат}}$, I_0 — токи через дополнительную катушку и соленоид соответственно.

Поскольку ВТСП-лента подвержена необратимому намагничиванию, с целью исключения влияния остаточных магнитных полей на результат каждое измерение при новом значении коэффициента ошибки проводилось через отепление экрана.

Результаты представлены на рис. 6 и 7. Как видно из графиков, экран заметно сглаживает провал поля в центре. Однако измерение B_ρ -компоненты в ненасыщенной области

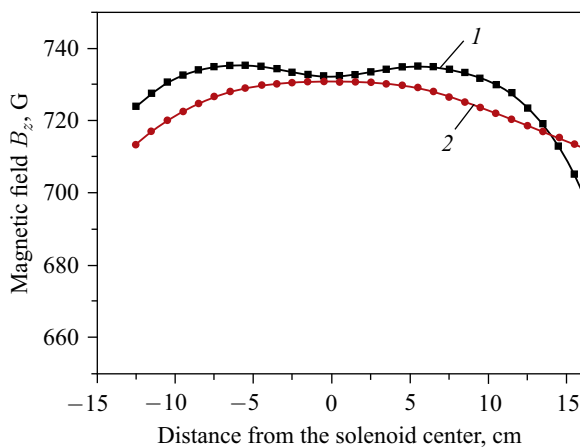


Рис. 6. Продольная компонента магнитного поля при $EF = 10^{-2}$ и основном поле 760 Гс: 1 — без экрана; 2 — с экраном

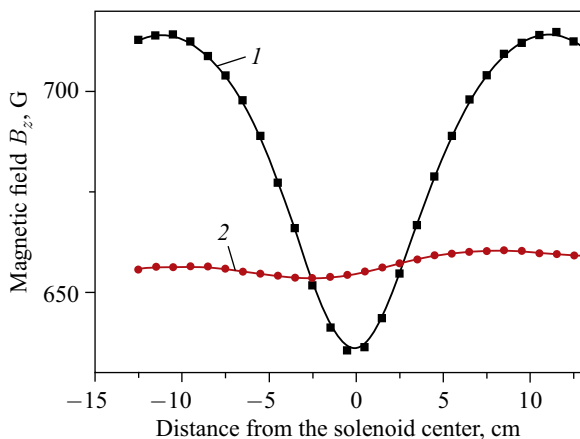


Рис. 7. Продольная компонента магнитного поля при $EF = 10^{-1}$ и основном поле 760 Гс: 1 — без экрана; 2 — с экраном

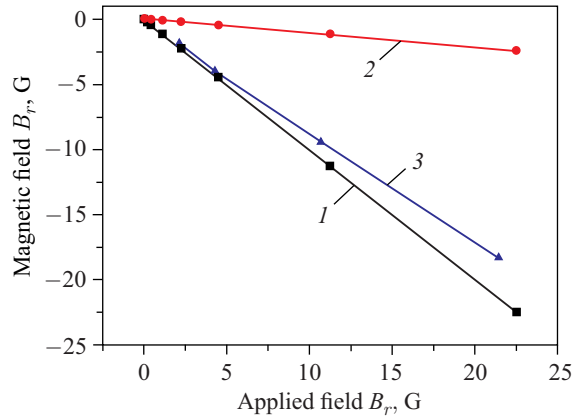


Рис. 8. Влияние малого точечного возмущения магнитного поля на экран: 1 — поле без экрана; 2 — четырехслойный экран; 3 — однослойный экран

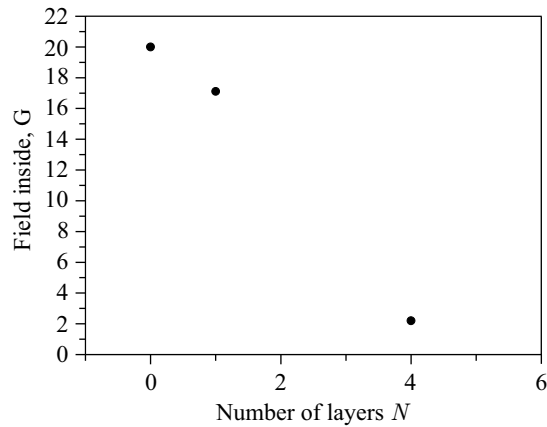


Рис. 9. Ослабление радиальной компоненты внешнего поля экраном в зависимости от числа слоев

экрана показало, что пока не достигнута необходимая точность. Поэтому для исключения ошибки, вызванной перемещением зонда по оси магнитной системы, предложен эксперимент, в котором измерительный зонд остается неподвижным в интересующей координате, а изменяется само поле.

Эксперимент состоял в следующем. Зонд фиксировался так, чтобы датчики Холла располагались напротив края дополнительной катушки. Экран охлаждался до 77 К в нулевом магнитном поле (на уровне поля Земли). Затем при выключенном основном соленоиде поле плавно вводилось в катушку и фиксировались показания с зонда. Измерению был подвергнут однослойный прототип ВТСП-экрана, а после увеличения количества слоев до четырех данные измерения были повторены. Результаты представлены на рис. 8, 9.

Из графиков видно (см. рис. 8), что в малых полях (далеких от насыщения) поле внутри экрана изменяется линейно с внешним полем и количеством слоев (см. рис. 9). Так, четырехслойный экран ослабляет радиальную компоненту в центре соленоида почти на порядок.

Тогда, чтобы достичь требуемой однородности магнитного поля 10^{-5} в соленоиде, изготовленном с точностью 10^{-4} (при номинальном поле 2 кГс это соответствует ошибке в 0,2 Гс), следует использовать четырехслойный ВТСП-экран данной конструкции (см. рис. 9). Можно предположить, что для соленоида с точностью намотки 10^{-3} потребуется экран, содержащий 10 слоев ВТСП-ленты.

Оценка погрешностей методики измерения. Погрешности измерения главным образом связаны с колебаниями зонда из-за люфтов между держателем и стенками экрана. Люфт в 0,5 мм при длине базы 55 мм (см. рис. 2) вызывает предельный угол наклона φ порядка 10^{-2} рад.

Как следует из рис. 10, при наклоне на такой угол однокомпонентный датчик Холла становится чувствительным ко второй компоненте поля. В этом случае, если датчик радиальный, по оси \perp он покажет искаженную компоненту

$$B_{\perp} = -B_z \sin \varphi + B_r \cos \varphi, \tag{3}$$

а если продольный, то по оси \parallel компоненту

$$B_{\parallel} = B_r \sin \varphi + B_z \cos \varphi, \tag{4}$$

где B_z, B_r — реальные продольная и радиальная компоненты магнитного поля соответственно. Выполнив обратное преобразование, получаем связи реальных и искаженных величин:

$$B_{\rho} = B_{\parallel} \sin \varphi + B_{\perp} \cos \varphi, \tag{5}$$

$$B_z = B_{\parallel} \cos \varphi - B_{\perp} \sin \varphi. \tag{6}$$

Итоговая величина погрешности ΔB поля, обусловленная угловым смещением зонда на малый угол $\varphi \ll 1$, дается выражениями

$$\Delta B_r \sim B_{\parallel} \Delta \varphi, \tag{7}$$

$$\Delta B_z \sim B_{\perp} \Delta \varphi. \tag{8}$$

Для угла наклона магнитных силовых линий к продольной оси (1) погрешность составляет

$$\Delta \theta \sim \Delta \varphi \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \theta)^2}. \tag{9}$$

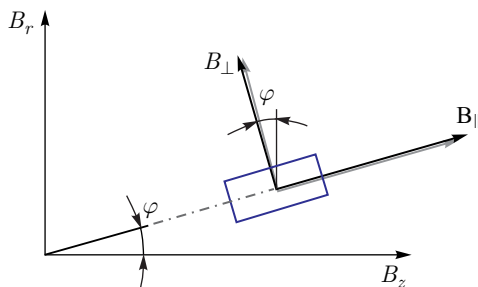


Рис. 10. Наклон чувствительной зоны датчика Холла к магнитной оси системы

ΔB_r , Гс/А	ΔB_z , Гс/А	$\Delta\theta$, рад
1,20	0,20	0,01

Принимая неопределенность угла $\Delta\varphi$ равной предельному углу наклона, получаем максимальную оценку погрешностей измеренных величин (см. таблицу).

Таким образом, точность методики находится в пределах 10^{-2} . Погрешность измерений с неподвижным зондом определяется, в первую очередь, стабильностью источников питания, погрешностью нуля датчиков Холла и не превышает 10^{-3} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые измерения подтвердили работоспособность прототипа ВТСП-экрана предложенной конструкции. Четырехслойный экран стабильно работает в радиальном поле до 120 Гс при величине продольной компоненты B_z до 800 Гс. Предполагается, что экран имеет идеальную форму, и точность его изготовления пока не входит в рассматриваемую задачу.

Ошибки измерений связаны главным образом с угловыми колебаниями датчиков Холла вследствие перемещения зонда. Точность измерения составила порядка 1%. Для минимизации ошибок предложена методика, когда зонд остается неподвижным и варьируется только внешнее поле. Данные измерения показали линейную зависимость ослабления компоненты радиального поля от количества слоев экрана. Установлено, что 1 слой ВТСП-ленты уменьшает радиальную компоненту поля соленоида в 1,2 раза; а 4 слоя — в 10 раз.

На следующих этапах исследования прототипа необходимо использовать методы измерения однородности поля на уровне 10^{-5} – 10^{-6} . Такую точность может дать, например, магнитооптический метод измерения однородности полей, предложенный коллегами из Института ядерной физики им. Г. И. Будкера [6].

Благодарности. Авторский коллектив выражает благодарность К. Козловскому за помощь в подготовке и проведении экспериментов, а также настройке измерительного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ahmanova E. et al.* // Proc. COOL'09 Workshop on Beam Cooling and Related Topics, Lanzhou, China, Aug. 31 – Sept. 4, 2009. P. 16.
2. *Sidorin A. O. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558. P. 325–328.
3. *Kulikov E. et al.* Improving Homogeneity of the Magnetic Field by a High-Temperature Superconducting Shield // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 507. P. 032028.
4. *Agapov N. N. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V. 9. P. 422–424.
5. *Kulikov E.* Superconducting Unclosed Shields in High Energy Physics. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/>.
6. *Bocharov V. N. et al.* // Instr. Exp. Techn. 2005. V. 48, No. 6. P. 772.