

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭКРАН ДЛЯ СОЛЕНоиДА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*Н. Н. Агапов, Д. Е. Донец, В. М. Дробин, Е. А. Куликов, Х. Малиновски,
Р. В. Пивин, А. В. Смирнов, Ю. В. Прокофьевичев, Г. В. Трубников*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Г. Л. Дорофеев

РНИЦ «Курчатовский институт», Москва

Получение высокой однородности магнитного поля в прямолинейном соленоиде системы электронного охлаждения является очень важной задачей. В системе электронного охлаждения коллайдера проекта NICA [1] предполагается использование сверхпроводящих соленоидов для формирования продольного магнитного поля. Для достижения необходимой однородности магнитного поля в секции охлаждения предполагается использовать сверхпроводящий экран. В статье описана конструкция сверхпроводящего экрана и представлены экспериментальные и численные исследования однородности магнитного поля в соленоидах со сверхпроводящим экраном.

The homogeneity of the magnetic field in the straight solenoid of the electron cooling system is the very important task. The superconducting solenoids are planned for electron cooling systems of collider rings of NICA project [1]. To reach the necessary homogeneity in the straight section the superconducting shield was proposed. The design of the superconducting shield, experimental and numerical investigation of the field homogeneity in the solenoid with the superconducting shield are presented.

PACS: 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства сверхпроводящих материалов (эффект Мейснера, высокая токнесущая способность) позволяют применять их для экранирования магнитного поля в различных устройствах, таких как камеры с магнитным вакуумом, ограничители тока, томографы и др. Так, при плотностях критического тока $5 \cdot 10^5$ А/см², доступных современной технологии, перепад магнитного поля на тонком слое сверхпроводника порядка 20 мкм может достигать 1000 Гс. Т.е. сверхпроводники могут экранировать весьма большие магнитные поля. В частности, известно использование сверхпроводящей ленты из ниобий-титанового сплава для повышения однородности магнитного поля сверхпроводящего соленоида [2, 3].

Целью данного исследования было решение задачи по получению однородного поля в прямолинейной секции электронного охлаждения. Важность таких исследований обусловлена тем, что стоимость соленоида для системы электронного охлаждения очень высока из-за сложности намотки сверхточных соленоидов с однородностью поля до 10^{-5} [1].

Когда протяженность соленоида составляет порядка 10 м и более, невозможно сделать односекционный соленоид большой протяженности с высокой точностью. Наличие нескольких секций приводит к возникновению неоднородности поля на стыках соленоидов. Использование сверхпроводящего экрана позволит решить эту проблему.

Для исследования принципиальной возможности использования сверхпроводимости при создании высокооднородных магнитных полей в больших объемах в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ были проведены эксперименты со сверхпроводящими соленоидами, внутрь которых был установлен сверхпроводящий экран. Конструкция экрана представляет собой многослойную незамкнутую намотку из сверхпроводящей фольги. В исследованиях выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования, полученными как с помощью стандартных программ моделирования магнитных полей, так и с помощью специально созданного программного кода, который моделирует поведение сверхпроводящего экрана.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ С КОРОТКИМ СОЛЕНОИДОМ

В Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ накоплен большой опыт по созданию сверхпроводящих магнитных систем [4]. В первом эксперименте был использован существующий сверхпроводящий соленоид длиной 150 мм, с внутренним диаметром 100 мм и внешним диаметром 130 мм. Экран был изготовлен из ленты сплава NbTi толщиной 150 мк, ширина ленты составляла 138 мм. Пять слоев экрана намотаны в виде спирали на цилиндрический каркас диаметром 78 мм. Слои экрана изолированы друг от друга конденсаторной бумагой.

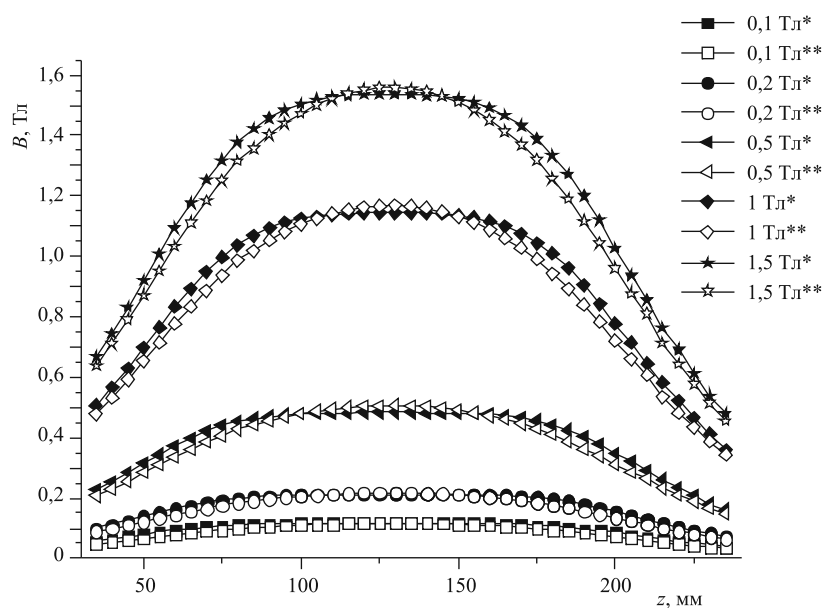


Рис. 1. Зависимость магнитного поля от продольной координаты для различных значений внешнего поля ($B = 0,1–1,5$ Тл) при наличии сверхпроводящего экрана (*) и без него (**)

Исследования влияния сверхпроводящего экрана на однородность магнитного поля проводились при различных токах соленоида (рис. 1). Сначала были проведены измерения поля без сверхпроводящего экрана, а затем при его наличии при тех же значениях тока в соленоиде. Измерение напряженности магнитного поля проводилось на оси магнитной системы с помощью однокомпонентного датчика Холла с шагом 5 мм. Чувствительность датчика Холла составляет 73 мВ/Тл.

Использование сверхпроводящего экрана приводит к тому, что даже в коротком соленоиде заметно увеличивается размер области с высокой однородностью поля. При этом происходит уменьшение значения поля в центре соленоида и увеличение поля на краях соленоида (рис. 1). Также с увеличением магнитного поля соленоида размер области с высокой однородностью снижается, что связано с насыщением сверхпроводящего экрана токами критической плотности.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ С ВЫСОКОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ ПОЛЯ

Для более детального исследования влияния сверхпроводящего экрана на однородность магнитного поля был специально создан соленоид с большим отношением длины к диаметру. Обмотка соленоида выполнена в четыре слоя из сверхпроводящего провода NbTi/Cu диаметром 0,5 мм. Длина намотки составляла 480 мм при внутреннем диаметре 80 мм. Экран выполнен из NbTi/Cu-фольги толщиной 20 мкм, шириной 80 мм. Намотка экрана проводилась секциями, каждая из которых содержала 15 слоев. Слои секций были изолированными конденсаторной бумагой. Секции укладывались последовательно на каркасах экранов. Очередной слой секций укладывался со смещением на 40 мм и перекрывал промежуток между нижними секциями. С наружной стороны экран был плотно бандажирован слоями изоляции. В центре поверх экрана была намотана добавочная катушка из сверхпроводящего провода, которая использовалась для имитации неоднородности магнитного поля соленоида.

Продольное магнитное поле измерялось на оси соленоида с помощью однокомпонентного датчика Холла, способного перемещаться на всю длину магнита. Ток основного соленоида составлял порядка 30 А. Были получены зависимости величины магнитного поля от продольной координаты при наличии сверхпроводящего экрана и без него (рис. 2). При этом начало горизонтальной координаты соответствует центру соленоида (край соленоида находится на расстоянии 240 мм от центра). В данных экспериментах точность измерения магнитного поля составляла порядка $\Delta B/B \sim 10^{-3}$, что в основном определялось стабильностью источника питания соленоида. Моделирование эффекта экранирования показало лишь качественное согласие с экспериментом в случае, когда вместо экрана использовался материал с нулевой магнитной проницаемостью (рис. 2, кружки и кривая 4).

Для исследования процесса экранирования была использована дополнительная катушка, расположенная в центре соленоида снаружи сверхпроводящего экрана. Катушка состояла из четырех витков сверхпроводящего провода диаметром 0,5 мм с максимальным током до 10 А. На рис. 3 приведена разница в относительных единицах между измерениями магнитного поля с использованием дополнительной катушки (поле включено в ту же сторону, что и в соленоиде) и без нее. Важно отметить, что дополнительная катушка не изменила однородность поля в центре соленоида, а изменила абсолютное значение поля в центре соленоида и распределение поля на краю соленоида.

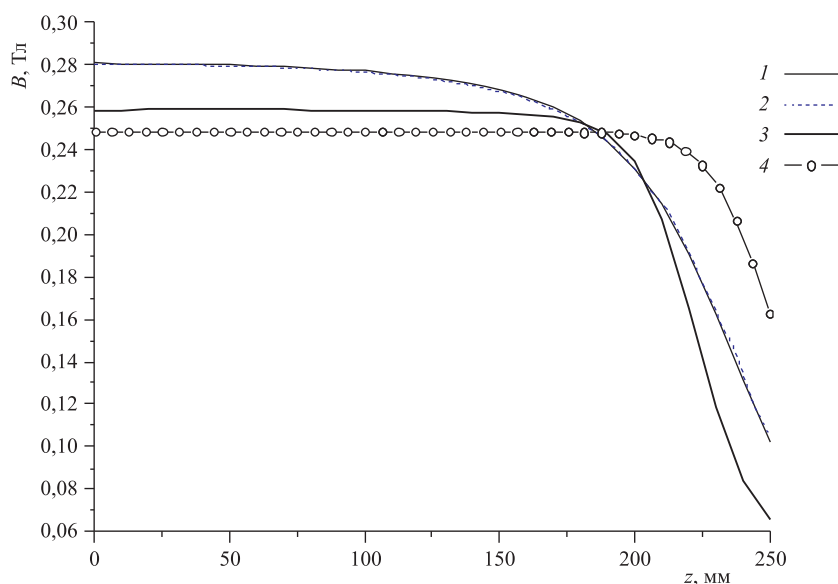


Рис. 2. Распределение магнитного поля по оси соленоида без сверхпроводящего экрана (1 — эксперимент, 2 — расчет) и при его наличии (3 — эксперимент, 4 — расчет)

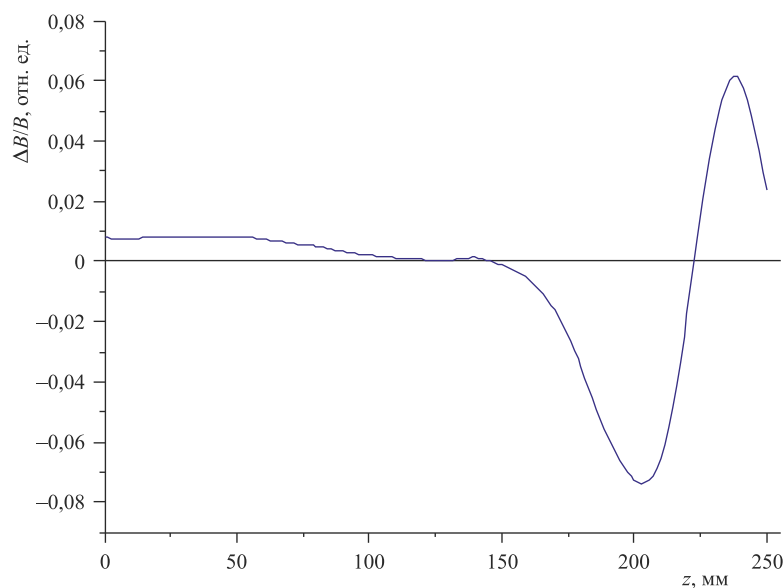


Рис. 3. Зависимость разницы, нормированной на абсолютное значение поля, между измерениями магнитного поля без дополнительной катушки и вместе с ней

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭКРАНА

Стандартные программы для расчета магнитных полей не позволяют корректно моделировать эффект экранирования с помощью сверхпроводящего экрана. Попытка замены сверхпроводящего экрана на материал с нулевой магнитной проницаемостью лишь ка-

чественно повторяет полученную экспериментальную зависимость (рис. 2), но не дает хорошего количественного совпадения.

В первом приближении многослойный экран, свернутый из сверхпроводящей фольги, подобен еще не свернутой в трубу пластине, находящейся во внешнем нормальном магнитном поле, соответствующей радиальной компоненте поля соленоида. В центре соленоида радиальная компонента магнитного поля обращается в нуль. В результате изменение магнитного поля приводит к возникновению двух замкнутых экранирующих токов в двух областях пластины с противоположным направлением внешнего поля. Такой характер протекания экранирующих токов должен приводить не только к повышению однородности магнитного поля в центре соленоида, но и к увеличению неоднородности поля (к увеличению радиальной компоненты магнитного поля) на краю соленоида.

Для моделирования эффекта экранирования при применении сверхпроводящего экрана была использована оригинальная программа, в которой действие экрана имитировалось дополнительными катушками, равномерно расположенными в три слоя вдоль оси основного соленоида. Ток в катушках подбирался с помощью того условия, что нормальная компонента на границе экрана стремится к нулю и сумма токов в каждом слое дополнительных катушек равна нулю. Результаты моделирования получили хорошее согласие с экспериментальными данными [2]. Было получено, что направление токов в дополнительных катушках на краю соленоида совпадает с направлением тока основного соленоида, а в центре они имеют противоположное направление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и численные исследования показали достаточно большую эффективность использования сверхпроводящего экрана для повышения однородности магнитного поля в прямолинейном соленоиде. Первые эксперименты с высокотемпературным сверхпроводником также продемонстрировали возможность его использования в качестве материала для сверхпроводящего экрана.

Направление дальнейших исследований включает в себя выбор наиболее подходящего материала сверхпроводника, в том числе из ВТСП, а также метода намотки сверхпроводящего экрана. Для исследования однородности поля необходимо улучшить стабильность источников питания соленоида и точность системы измерения магнитного поля соленоида. Для моделирования процесса эффекта экранирования необходимо дальнейшее развитие алгоритмов расчета, чтобы провести численную оптимизацию параметров сверхпроводящего экрана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meshkov I. et al. Application of Cooling Methods to NICA Project // Proc. of COOL'09 Workshop, Lanzhou, China, 2009.
2. Лазарев Б. Г., Лазарева Л. С., Полтавец В. А. О получении однородного постоянного магнитного поля в сверхпроводящих соленоидах при помощи экрана из сверхпроводника с высокими параметрами // Докл. АН СССР. 1972. Т. 203, вып. 4. С. 810–812.
3. Бычков Ю. Ф., Комаров А. О., Хлопков А. К. Изучение факторов, влияющих на эффективность сверхпроводящих экранов, применяемых для повышения однородности магнитного поля // Металлургия и металловедение чистых металлов. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 14. С. 53–63.
4. Дробин В. М. и др. Сверхпроводящая магнитная система с криокулером для источника ионов DECRIS-SC // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 1 (130). С. 45–62.