

PACS: 07.55.Db, 84.32.Nh, 84.71.Ba, 84.71.Mn

Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ СОЛЕНОИД С ОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И ИНДУКЦИЕЙ 9.2 Т

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 4 июня 2017 года

*Описан лабораторный сверхпроводниковый соленоид, близкий к оптимальному по расходу дорогостоящего сверхпроводника и создающий в рабочей отверстии диаметром 34 мм магнитное поле с индукцией 9.2 Т при температуре 4.2 К. Соленоид изготовлен по бескаркасной технологии путем замоноличивания его обмотки эпоксидной смолой УП-6-101 с наполнителем – мелкодисперсным  $\beta$ -эвкриптитом Ситал-ЭА-1-6. В качестве обмоточного провода использован сверхпроводник сплава НТ-50 диаметром 0.7 и 0.5 мм. Максимальный ток соленоида составил 95% критического тока короткого образца исходного материала. При длине соленоида 135 мм достигнута однородность магнитного поля  $6 \cdot 10^{-5}$  Ое на длине 10 мм и  $2 \cdot 10^{-4}$  Ое на длине 30 мм вдоль оси.*

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый соленоид, магнитное поле, критический ток, бескаркасная обмотка, секции соленоида, магнитная постоянная, однородность магнитного поля

Для получения сильных магнитных полей с индукцией до 10 Т при температуре 4.2 К наиболее широко применяют сверхпроводники из сплава НТ-50. При температуре ниже 4.2 К магнитное поле сверхпроводниковых соленоидов из этого сплава увеличивается до 12 Т [1,2].

С целью достижения высокой однородности магнитного поля в центральной зоне цилиндрического соленоида используются методы суперпозиции и разложения поля в степенной ряд, включающий полиномы Лежандра, который сходится внутри сферы радиусом  $Z \leq a_1$  (где  $a_1$  – внутренний радиус соленоида) [3]. Методы основаны на «вычитании» из обмотки соленоида меньшей компенсирующей обмотки, выбранной таким образом, чтобы сократить один или несколько членов степенного ряда. Число свободных переменных величин компенсирующей обмотки (внутренний и наружный радиусы, длина, плотность тока) определяет число членов ряда, которые можно сократить. Имея одну свободную переменную, можно сократить первый четный член ряда, в результате получают соленоид с поперечной щелью (система Гельмгольца). Если имеются две переменные, можно сократить два первых члена ряда и получить соленоид, скорректированный внутренним

или наружным пазами, у которых свободными переменными являются радиус и длина паза.

В настоящей статье описан близкий к оптимальному по расходу дорогостоящего сверхпроводника лабораторный сверхпроводниковый соленоид, создающий в рабочем отверстии диаметром 34 mm магнитное поле с индукцией до 9.2 Т и однородностью  $6 \cdot 10^{-5}$  Ое на 10 mm и  $2 \cdot 10^{-4}$  Ое на 30 mm вдоль оси. Соленоид используется в составе комплекса криогенного оборудования для исследований магнитных и сверхвысокочастотных свойств гетероструктур в диапазоне магнитного поля 0–9 Т.

Конструктивно соленоид состоит из двух секций, намотанных в виде одной обмотки, изготовлен из сверхпроводникового провода сплава НТ-50 диаметром 0.7 и 0.5 mm. К размерам соленоида были предъявлены такие требования: диаметр внутреннего отверстия не менее 34 mm, внешний диаметр не более 110 mm и длина не более 140 mm.

Расчет максимальной магнитной индукции и рабочего тока при последовательном соединении секций соленоида и запитке их от одного источника питания осуществляли по кривым зависимости критического тока от магнитной индукции коротких образцов используемых проводов диаметром 0.7 и 0.5 mm (рис. 1).

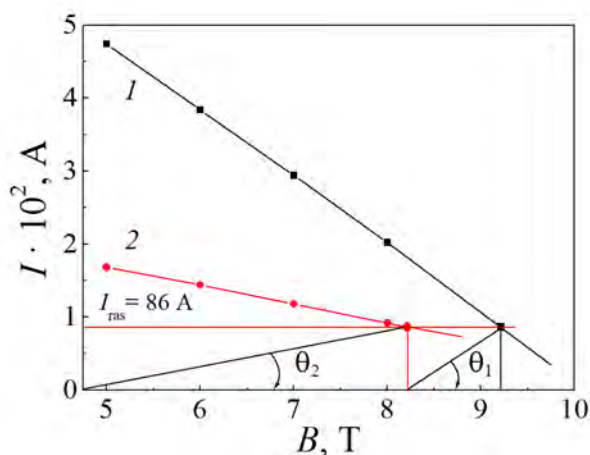


Рис. 1. Схема расчета секционированного соленоида с индукцией магнитного поля 9.2 Т: 1, 2 – характеристики  $I_c(B)$  сверхпроводникового провода диаметром соответственно 0.7 и 0.5 mm

По пересечению ординаты, соответствующей значению магнитной индукции  $B = 9.2$  Т, по кривой 1 определен критический ток сверхпроводникового соленоида, который равен 86 А. Из полученного значения тока и условия полной загрузки секций током по известной схеме [3] рассчитаны последовательно (начиная с первой) магнитные постоянные и геометрические размеры секций соленоида:

$$C_i = \frac{\Delta B_i}{I} = \text{ctg} \theta_i = n_i a_i F, \quad (1)$$

где  $C_i$  – магнитная постоянная  $i$ -й секции;  $B_i$  – индукция магнитного поля, создаваемая  $i$ -й секцией;  $I$  – ток соленоида;  $n$  – плотность витков обмотки;  $F$  – форм-фактор обмотки;  $a_i$  – внутренний радиус секции.

Первая секция изготовлена из сверхпроводникового провода диаметром 0.7 mm, вторая – из провода диаметром 0.5 mm. Согласно выражению (1) и рис. 1 расчетные значения магнитной постоянной первой секции  $C_1 = 1 \text{ T}/86 \text{ A} = 0.0116 \text{ T/A}$ , второй –  $C_2 = 8.2 \text{ T}/86 \text{ A} = 0.0953 \text{ T/A}$ , соленоида –  $C_\Sigma = 0.1069 \text{ T/A}$ . Зная магнитные постоянные и внутренний диаметр обмотки соленоида, сначала определяли геометрические размеры секций без учета корректирующего элемента (внутреннего или наружного паза, служащего для улучшения однородности магнитного поля), mm:

	1-я секция	2-я секция
внутренний диаметр	34	45
наружный диаметр	45	104
длина	135	135

Однородность магнитного поля в центре соленоида низкая и равна всего лишь  $1.3 \cdot 10^{-2} \text{ Oe}$  на длине 30 mm.

Для улучшения однородности магнитного поля в обмотке первой секции выполнен внутренний корректирующий паз. Его высоту выбирали из условия кратности толщине слоя обмотки из провода диаметром 0.7 mm. Варьируя высоту и длину паза, определяли его оптимальные размеры, которые составили: внутренний диаметр 34 mm, наружный – 42.5 mm, длина 40 mm, при этом высота паза была равна толщине шести слоев обмотки. Кроме того, размеры внутреннего паза были выбраны с учетом условия, чтобы в распределении магнитного поля в центре соленоида имела место небольшая поправка поля в виде «провала», которая увеличивает длину зоны однородности поля. Внутренний паз представляет собой пустоту в обмотке, поэтому магнитная постоянная первой секции уменьшилась. Для обеспечения расчетного значения магнитной постоянной первой секции 0.0116 T/A ее наружный диаметр был увеличен до 51.6 mm. При этом уменьшилась магнитная постоянная второй секции, и для обеспечения ранее рассчитанного ее значения был увеличен наружный диаметр до 108 mm. Расчетное значение магнитной постоянной соленоида увеличилось и составило 0.1097 T/A.

Обмотка сверхпроводникового соленоида изготовлена по бескаркасной технологии с использованием эпоксидной смолы УП-6-101 с наполнителем – мелкодисперсным  $\beta$ -эвкрипитом Ситал-ЭА-1-6 [4] – в качестве связующего. Для намотки бескаркасной обмотки была разработана и изготовлена разборная технологическая оснастка. Число слоев в первой секции 12, а число витков 1799. Во второй секции соответственно число слоев 50, число витков 12596. На изготовление соленоида использовано 5.5 kg сверхпроводникового провода.

Для закрепления наружных слоев сверху обмотки намотано четыре слоя стеклотенты, пропитанной эпоксидной смолой. После окончания намотки соленоид вместе с технологической оснасткой помещали в термический шкаф и при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  в течение 8 h производили полимеризацию смолы. Затем с обмотки соленоида снимали технологическую оснастку, а снаружи обмотки устанавливали бандаж в виде цилиндрической обечайки из немагнитной нержавеющей стали толщиной 1 mm. В верхней части к обечайке приварен фланец толщиной 6 mm, на котором крепится контактная плата с медными дорожками для распайки выводов обмотки соленоида. Во фланце также выполнены три отверстия с резьбой, в которые ввинчены шпильки для монтажа соленоида на подвеску гелиевого криостата. Внешний вид соленоида показан на рис. 2.

Низкотемпературные испытания соленоида проводили в гелиевом криостате КГ-150. Запитку соленоида током осуществляли от блока питания ИТ-100 выходным током до 100 А. Цель испытаний – определение максимального рабочего тока, максимальной магнитной индукции и однородности магнитного поля в центральной зоне соленоида. При испытаниях соленоида наблюдали недлительную тренировку критического тока. Соленоид один раз перешел из сверхпроводникового в нормальное состояние при токе 65 А, при котором магнитная индукция составила 7.25 Т. Повторная запитка соленоида позволила ввести в соленоид ток величиной 82 А без перехода в нормальное состояние, при этом магнитная индукция составила 9.2 Т. Магнитная постоянная соленоида, измеренная автодинным магнитометром ядерного магнитного резонанса [5], составила 0.1123 Т/А и была несколько больше ее расчетного значения, что обусловлено более высокой плотностью витков обмотки по сравнению с расчетной. Поэтому при том же значении магнитной индукции (9.2 Т) критический ток соленоида уменьшился с 86 до 82 А. Следует отметить, что ток величиной 82 А составил 95% критического тока короткого образца сверхпроводникового провода диаметром 0.7 mm и 92% тока короткого образца провода диаметром 0.5 mm.

С целью повышения точности измерения распределения и однородности магнитного поля вдоль оси соленоида путем повышения стабильности поля во времени к выводам обмотки был подпаян сверхпроводниковый ключ. Кроме того, запитку соленоида током осуществляли с перемагничиванием сверхпроводниковой обмотки, которая заключается в наборе тока величиной



Рис. 2. Внешний вид соленоида

на 0.3–0.7% больше рабочего значения. После этого ток уменьшали до рабочего значения, а сверхпроводниковый ключ «замораживали». Такой способ запитки позволяет дополнительно повысить стабильность магнитного поля, короткозамкнутого ключом соленоида примерно на порядок в течение 1 h. Эффект перемагничивания обусловлен затуханием диамагнитных токов в ниобий-титановых жилах и токов Фуко в медной матрице композитного сверхпроводника. Также для повышения точности измерений магнитное поле вдоль оси соленоида измеряли два раза – при перемещении датчика поля с верхнего положения до нижнего и обратно, после чего полученные результаты усредняли, что позволяло исключить влияние дрейфа магнитного поля в сторону его увеличения или уменьшения.

Для измерения распределения магнитного поля вдоль оси соленоида на большой длине ( $\pm 50$  mm) использовали преобразователь Холла ПХЭ 606118В, а для измерения поля в центральной однородной зоне – автодинный магнитометр ядерного магнитного резонанса с выносной штангой с датчиком. В качестве спинсодержащего вещества датчика, на котором наблюдали сигнал ядерной магнитной индукции, использовали мелкодисперсный алюминиевый порошок, растворенный в эпоксидной смоле.

Распределение магнитной индукции в центре соленоида приведено рис. 3, из которого видно, что на кривой распределения поля в центре соленоида имеется небольшой провал за счет перекоррекции поля внутренним пазом. Это позволило увеличить длину однородного участка магнитного поля примерно на 20%. Однородность магнитного поля в центре соленоида, измеренная при индукции 6.15 T, составила  $6 \cdot 10^{-5}$  Oe на 10 mm и  $2 \cdot 10^{-4}$  Oe на 30 mm вдоль оси.

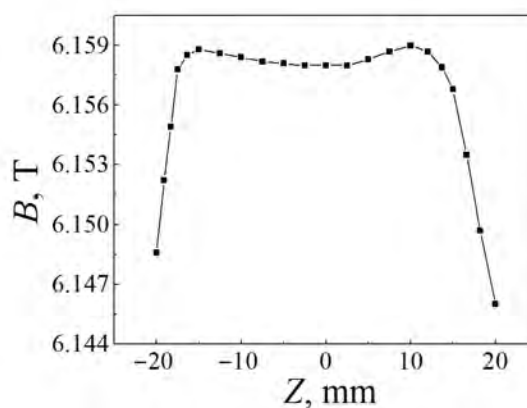


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля вдоль оси соленоида при токе 54.7 А

### Выводы

1. Результаты разработки и исследований показали возможность создания лабораторного сверхпроводникового соленоида с индукцией магнитного поля 9.2 T в рабочем отверстии диаметром 34 mm при температуре 4.2 K. Вес соленоида менее 6 kg.

2. Применение бескаркасной технологии изготовления соленоида путем компаундирования обмотки эпоксидной смолой обеспечивает ток в соленоиде, равный 95% критического тока короткого образца.

3. При длине обмотки 135 mm достигнута однородность магнитного поля в центре соленоида величиной  $6 \cdot 10^{-5}$  Oe на 10 mm и  $2 \cdot 10^{-4}$  Oe на 30 mm вдоль оси.

1. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, С.И. Горидов, ДАН СССР **199**, 1044 (1971).
2. И.Г. Гавриш, В.В. Пермяков, В.П. Христенко, Н.В. Таряник, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: фундаментальная и прикладная сверхпроводимость, ХФТИ АН УССР, Харьков (1977), вып. 1(5), с. 35.
3. Д. Монтгомери, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).
4. А.с. СССР № 1210443, Полимерная композиция (публикации не подлежит).
5. А.А. Глуценко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).

*D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik, E.A. Dvornikov, D.O. Fedyuk*

#### LABORATORY SUPERCONDUCTING SOLENOID CHARACTERIZED BY UNIFORM MAGNETIC FIELD AND THE DENSITY OF 9.2 T

A laboratory superconducting solenoid is described that is close to the optimum with respect to the consumption of an expensive superconductor. The solenoid provides the magnetic field of 9.2 T in density at the temperature of 4.2 K within the work hole of 34 mm in diameter. The solenoid is produced by frameless technique, including embedment of the coil with epoxy resin UP-6-101 and finely divided  $\beta$ -eucryptite Sital-EA-1-6 used as filler. As a coil wire, superconductor of 0.7 and 0.5 mm in diameter made of HT-50 alloy was used. The maximum current of the solenoid was 95% of the critical current of a short sample of the original material. At the solenoid length of 135 mm, homogeneity of the magnetic field of  $6 \cdot 10^{-5}$  Oe and  $2 \cdot 10^{-4}$  Oe was reached at the distance of 10 mm and 20 mm along the axis, respectively.

**Keywords:** superconducting solenoid, magnetic field, critical current, frameless coil, solenoid sections, vacuum permeability, magnetic field homogeneity

**Fig. 1.** Scheme of calculation of a fractional solenoid characterized by the magnetic field density of 9.2 T: 1, 2 –  $I_c(B)$  characteristics of a superconducting wire of 0.7 and 0.5 mm in diameter, respectively

**Fig. 2.** Exterior of the solenoid

**Fig. 3.** Distribution of the magnetic field density along the solenoid axis at the current of 54.7 A