

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

Н.В. Таряник, Д.В. Варюхин, Д.О. Федюк

## ИЗМЕРЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СОЛЕНОИДОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ВЫШЕ 4.2 К

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

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2017 года

*Измерена зависимость критического тока коротких образцов сверхпроводникового провода из сплава HT-50 и лабораторных соленоидов весом до 4 kg, изготовленных из того же провода, от температуры в диапазоне 4.2–8 К в магнитном поле с индукцией до 7 Т. Критический ток соленоида отличается от критического тока короткого образца не более чем на 10%. Показана возможность криостатирования сверхпроводниковых соленоидов (СПС) с магнитной индукцией 3–4 Т при температурах до 6 К.*

**Ключевые слова:** короткий образец, сверхпроводниковый соленоид, криомагнитная система, критический ток, индукция магнитного поля, температура, жидкий гелий

Необходимость повышения температуры криостатирования СПС выше 4.2 К вызвана как конструктивными особенностями криостатов, в которых размещаются СПС, так и требованиями увеличения времени работы криостата с одной заливки жидким гелием. Конструкция криостата со сквозным «теплым» вертикальным каналом, в котором размещается, например, гиротрон, определяется конструктивными особенностями последнего. Так, высота гелиевого криостата одной из криомагнитных систем [1], разработанной в СКТБ ДонФТИ АН УССР, равна 380 mm, при этом высота гелиевой емкости 270 mm, а высота расположенного в ней СПС 240 mm. По истечении определенного промежутка времени (~ 5 h) с момента заливки криостата жидким гелием уровень последнего становится ниже верхнего края СПС, часть его обмотки находится в парах жидкого гелия при температуре выше 4.2 К, и возникает вероятность перехода соленоида в нормальное состояние. Несмотря на то, что СПС, как правило, имеют определенный запас по току и магнитной индукции, все же необходимо знать область температур выше 4.2 К, в которой обеспечивается безаварийная работа соленоидов.

Известно [2], что для большинства неидеальных сверхпроводников второго рода зависимость критического тока  $I_{cr}$  от температуры  $T$  при постоянной магнитной индукции  $B$  с приемлемой степенью точности можно считать линейной:

$$\frac{I_{cr_0}(T, B)}{I_{cr_v}} = 1 - \frac{(T - T_v)}{(T_{cr_0} - T_v)}, \quad (1)$$

где  $I_{cr_v}$  – критический ток при температуре ванны с гелием  $T_v$ ;  $T_{cr_0}$  – критическая температура сверхпроводника при нулевом значении магнитной индукции  $B$ . Если в качестве исходной температуры выбрать 4.2 К, то критический ток при этой температуре будет связан с критическим током при любой температуре соотношением

$$\frac{I_{cr}(T, B)}{I_{cr}(4.2 \text{ К}, B)} = \frac{(T_{cr_0} - T)}{(T_{cr_0} - T_v)}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при температурах выше 4.2 К критический ток сверхпроводника уменьшается и при критической температуре он равен нулю [3].

На сегодняшний день имеется множество разработок криостатов с длительным ресурсом работы с одной заливки жидким гелием, достигающим сотен и тысяч часов [4], при этом жидкий гелий находится при температуре кипения 4.2 К. Тепло, подводимое к гелиевой ванне криостата, затрачивается на испарение жидкого гелия, скрытая теплота испарения которого мала и равна 2.58 кДж/л. Однако при температуре выше 5.2 К жидкий гелий становится газообразным, а поскольку теплосодержание газообразного гелия выше, чем скрытая теплота испарения жидкого гелия (например, при 6 К это превышение составляет 2.1 раза), то при прочих равных условиях можно во столько же раз увеличить ресурс работы криостата. С учетом этого свойства гелия были выполнены исследования по выяснению возможности криостатирования соленоидов при температурах выше 4.2 К (вплоть до 6–8 К).

Цель работы – определение области температур, при которых обеспечивается надежная безаварийная работа СПС.

В литературе мало внимания уделено поведению сверхпроводников, а тем более сверхпроводниковых устройств, создающих сильное магнитное поле при температурах выше 4.2 К. В наших исследованиях измеряли критический ток небольших соленоидов (весом до 4 кг) из провода сплава НТ-50 при температуре до 8 К в магнитном поле с индукцией до 7 Т.

Для сравнения и проверки достоверности результатов также измеряли критический ток коротких образцов сверхпроводниковых проводов при температуре выше 4.2 К. Для этих измерений использовали криомагнитную систему, схема которой приведена на рис. 1. Система включает гелиевый криостат 1 модели КГ-150, СПС 2, гелиевый сосуд 3, нижняя часть которого расположена в отверстии соленоида, трубчатую штангу 4 с держателем исследуемого образца 6, установленную в сосуде 3. В нижней части штанги заканчивается цилиндрической вставкой 5 из стеклотекстолита, в которой установлен П-образный держатель исследуемого образца. Держатель образца изготовлен из нержавеющей стали толщиной 1 мм и шириной 4 мм.

Внутри штанги установлены силовые токовводы 7 для запитки образца током. В нижней части токовводы подпаяны к образцу, а в верхней – подключены к клеммам 8, потенциальные выводы от образца (на рисунке не показаны) выведены на вакуумный разъем 12. Штанга содержит два П-образных держателя для испытания одновременно двух образцов. Во фланце 9 криостата гелиевый сосуд загерметизирован резиновым уплотнением 10, а штанга – уплотнением 11.

Соленоид 2-секционной конструкции служит для возбуждения магнитного поля с индукцией до 8 Т, изготовлен по бескаркасной технологии и намотан проводом диаметром 0.7 и 0.5 мм из сплава НТ-50. Диаметр внутреннего отверстия соленоида 54 мм, наружный диаметр 130 мм, длина 140 мм. Соленоид работает при температуре 4.2 К. При токе в обмотке 74 А он создает поле с индукцией 8.2 Т, а для обеспечения режима «замороженного» магнитного потока используется сверхпроводниковый ключ.

Гелиевый сосуд изготовлен из тонкостенных труб, при этом наружная труба, располагаемая в отверстии СПС, имеет диаметр 52 мм, а внутренняя, в которой размещается штанга с образцом, – 44 мм. В верхней части (над соленоидом) гелиевый сосуд имеет расширение для увеличения количества жидкого гелия. В этой части наружная труба сосуда 3 имеет диаметр 82 мм, внутренняя – 74 мм. Пространство между трубами откачено до давления 0.1 Па.

Момент перехода исследуемого образца из сверхпроводникового состояния в нормальное регистрировали по появлению напряжения на потенциальных выводах. Температуру гелия и исследуемого образца выше 4.2 К

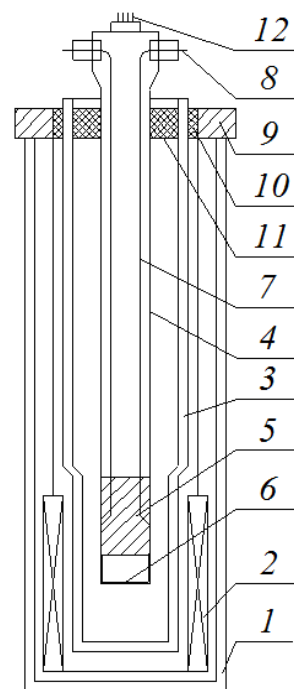


Рис. 1. Схема криомагнитной системы для измерения критического тока коротких образцов сверхпроводника

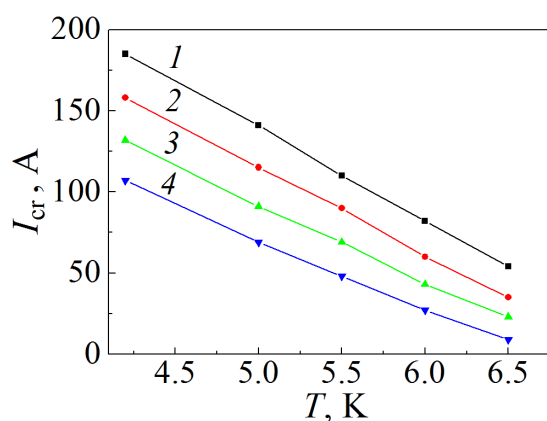


Рис. 2. Зависимость критического тока коротких образцов провода Ø 0.5 мм от температуры в магнитном поле с индукцией В, Т: 1 – 3, 2 – 4, 3 – 5, 4 – 6

обеспечивали путем повышения давления паров жидкого гелия в сосуде и регистрировали германиевым термометром сопротивления.

На рис. 2 представлены результаты измерения критического тока коротких образцов сверхпроводникового провода диаметром 0.5 mm с количеством жил 132 из сплава НТ-50 в интервале температур 4.2–7 К при разных значениях магнитной индукции.

Зависимость критического тока соленоидов от температуры изучали на трех лабораторных соленоидах, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сверхпроводниковых соленоидов

| № п/п | Диаметр соленоида |          | Длина соленоида | Диаметр провода | Количество, шт |                 |             | Магнитная постоянная, Т/А |
|-------|-------------------|----------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------|---------------------------|
|       | внутренний        | наружный |                 |                 | жил в проводе  | слоев в обмотке | термометров |                           |
|       |                   |          |                 |                 |                |                 |             |                           |
| 1     | 22.5              | 79.0     | 100             | 0.5             | 132            | 54              | 2           | 0.105                     |
| 2     | 22.5              | 79.8     | 100             | 0.5             | 48             | 52              | 2           | 0.114                     |
| 3     | 31.4              | 79.0     | 155             | 0.5             | 36             | 40              | 2           | 0.085                     |

Конструктивно соленоиды № 1 и 2 идентичны и отличаются только тем, что обмотки изготовлены из проводника с разным количеством сверхпроводниковых жил. В качестве межслойных прокладок использована конденсаторная бумага толщиной 0.03 mm. Соленоид № 3 отличается большей длиной, но меньшей толщиной обмотки, а также тем, что в качестве межслойных прокладок использована медная фольга толщиной 0.05 mm. Медные прокладки служат для выравнивания температуры по всему объему соленоида.

Температуру соленоидов выше 4.2 К обеспечивали путем повышения давления паров жидкого гелия в криостате КГ-100М. Контроль температуры в обмотках соленоидов осуществляли германиевыми термометрами сопротивления. Давление в криостате измеряли образцовым манометром модели 11202, а поддержание его заданного значения обеспечивали с помощью игольчатого вентиля. Запитку соленоидов осуществляли от стабилизированного источника питания БП-200 с цифровой индикацией тока.

Результаты измерений критического тока соленоидов в собственном магнитном поле в интервале температур 4.2–7.9 К представлены в табл. 2. Сравнительные характеристики критического тока сверхпроводникового провода диаметром 0.5 mm в виде коротких образцов и соленоида № 1, изготовленного из этого провода, приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что критический ток короткого образца  $I_{c_{sh}}$  и критический ток соленоида № 1  $I_{c_s}$  в интервале температур 4.2–6.5 К отличаются не более чем на 10%. Одной из причин того, что критический ток соленоида

меньше критического тока короткого образца, является деградация тока соленоида, обусловленная в первую очередь несовершенством технологии изготовления сверхпроводниковых обмоток.

Таблица 2

**Результаты измерений критического тока соленоидов в собственном магнитном поле в интервале температур 4.2–7.9 К**

| Температура $T$ , К | Параметры    |              |                                  |
|---------------------|--------------|--------------|----------------------------------|
|                     | $B_{cr}$ , Т | $I_{cr}$ , А | $I_{cr}(T)/I_{cr}(4.2\text{ К})$ |
| СПС № 1             |              |              |                                  |
| 4.2                 | 7.17         | 68.5         | 1.0                              |
| 4.92                | 6.14         | 58.5         | 0.86                             |
| 5.0                 | 6.1          | 58.2         | 0.85                             |
| 5.38                | 5.5          | 53.6         | 0.78                             |
| 5.5                 | 5.4          | 51.5         | 0.75                             |
| 6.12                | 4.2          | 42.0         | 0.59                             |
| 6.5                 | 3.74         | 35.7         | 0.52                             |
| 6.68                | 3.5          | 33           | 0.48                             |
| СПС № 2             |              |              |                                  |
| 4.2                 | 7.6          | 66.8         | 1.0                              |
| 4.98                | 6.5          | 57.1         | 0.855                            |
| 5.82                | 5.25         | 46.1         | 0.68                             |
| 5.9                 | 5.2          | 45.6         | 0.68                             |
| 6.4                 | 4.5          | 39.5         | 0.59                             |
| 6.67                | 4.08         | 35.8         | 0.535                            |
| СПС № 3             |              |              |                                  |
| 4.2                 | 6.4          | 75.0         | 1.0                              |
| 5.0                 | 5.4          | 63.5         | 0.85                             |
| 5.75                | 4.5          | 52.7         | 0.70                             |
| 6.15                | 3.8          | 45.0         | 0.60                             |
| 6.93                | 2.7          | 32.0         | 0.43                             |
| 7.9                 | 1.7          | 20.0         | 0.27                             |

Таблица 3

**Сравнительные характеристики критического тока СПС № 1 и короткого образца сверхпроводникового провода диаметром 0.5 mm**

| Характеристики критического тока | $T$ , К |      |      |      |      |
|----------------------------------|---------|------|------|------|------|
|                                  | 4.2     | 5.0  | 5.5  | 6.12 | 6.5  |
| $B$ , Т                          | 7.0     | 6.1  | 5.3  | 4.5  | 4.0  |
| $I_{cr_{sh}}$ , А                | 80      | 65   | 58   | 47   | 35   |
| $I_{cr_s}$ , А                   | 72      | 58.2 | 51.5 | 42.0 | 35.7 |
| $I_{cr_s}/I_{cr_{sh}}$           | 0.90    | 0.90 | 0.89 | 0.90 | 1.0  |

Критический ток СПС из сплава НТ-50 при некоторых конкретных температурах в магнитном поле с индукцией, например, 3 Т (такое значение по-

ля характерно для большинства соленоидов криомагнитных систем гиротронов в миллиметровом диапазоне длин волн) определяется через критический ток при 4.2 К в виде соотношений:

$$I_{cr}(5 \text{ К}) = 0.75I_{cr}(4.2 \text{ К}); \quad I_{cr}(5.5 \text{ К}) = 0.6I_{cr}(4.2 \text{ К}); \\ I_{cr}(6 \text{ К}) = 0.44I_{cr}(4.2 \text{ К}); \quad I_{cr}(6.5 \text{ К}) = 0.3I_{cr}(4.2 \text{ К}).$$

### Выводы

1. Создана установка и выполнены измерения критического тока коротких образцов сверхпроводникового провода из сплава НТ-50 в диапазоне температур 4.2–8 К в магнитном поле с индукцией до 7 Т.

2. Исследована температурная зависимость (в указанном температурном интервале) критического тока трех лабораторных СПС весом до 4 кг, изготовленных из того же провода, что и короткие образцы. Критический ток СПС отличается от критического тока короткого образца не более чем на 10%.

3. Показана возможность криостатирования таких СПС с магнитной индукцией 3–4 Т при температурах вплоть до 6 К.

1. В.К. Литвинов, П.Н. Постол, С.И. Папаянин, О.В. Дорошев, ПТЭ № 3, 247 (1987).
2. В.А. Альтов, В.Б. Зенкевич, Н.Г. Кремлев, В.В. Сычев, в кн.: Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем, Энергия, Москва (1975), с. 70–87.
3. Б.Г. Лазарев и др., в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: фундаментальная и прикладная сверхпроводимость, ХФТИ АН УССР, Харьков (1973), вып. 1(1), с. 48.
4. А.А. Галкин, В.И. Курочкин, А.Г. Демшиев, В.З. Суплин, Д.П. Пелых, Доклады АН УССР. Серия А: Физико-математические и технические науки № 8, 55 (1982).

*N.V. Taryanik, D.V. Varyukhin, D.O. Fedyuk*

### MEASUREMENT OF CRITICAL PARAMETERS OF SUPERCONDUCTING SOLENOIDS AT THE TEMPERATURE ABOVE 4.2 K

The temperature dependence of the critical current of short samples of a superconducting wire made of HT-50 alloy and laboratory solenoids of the same wire up to 4 kg in weight has been measured within the range of 4.2–8 K in magnetic field with induction up to 7 T. The critical current of the solenoid differs from that of the short sample by no more than 10%. A possibility of cryostatting of superconducting solenoids (SCS) characterized by magnetic induction of 3–4 T at the temperature below 6 K has been demonstrated.

**Keywords:** short sample, superconducting solenoid, cryomagnetic system, critical current, magnetic field induction, temperature, liquid helium

**Fig. 1.** Scheme of the cryomagnetic system for the measurement of the critical current of short samples of a superconductor

**Fig. 2.** Temperature dependence of the critical current of short samples of a wire  $\varnothing$  0.5 mm in magnetic field at induction  $B$ , T: 1 – 3, 2 – 4, 3 – 5, 4 – 6