

УДК 537.626:538.945

## СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД (7 Тл) С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ КРИОКУЛЕРАМИ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. А. В. Брагин<sup>а, \*</sup>, А. А. Волков<sup>а, б</sup>, В. В. Кубарев<sup>а</sup>, Н. А. Мезенцев<sup>а, б</sup>, О. А. Тарасенко<sup>а</sup>, С. В. Хрущев<sup>а, б</sup>, В. М. Цуканов<sup>а, б</sup>, В. А. Шкаруба<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>б</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ЦКП “СКИФ”), Новосибирск, 630559 Россия

\*e-mail: [bragin@inp.nsk.su](mailto:bragin@inp.nsk.su)

Поступила в редакцию 01.12.2022 г.

После доработки 10.02.2023 г.

Принята к публикации 10.02.2023 г.

Представлены результаты испытаний и рабочие характеристики сверхпроводящего соленоида с косвенным охлаждением на основе криокулеров, который будет использоваться на экспериментальной станции терагерцовой спектроскопии лазера на свободных электронах в Институте ядерной физики. Сверхпроводящий соленоид был рассчитан на магнитное поле 6.5 Тл при диаметре обмотки 102 мм и длине 0.5 м. Диаметр теплого канала 80 мм доступен для экспериментов по терагерцовой спектроскопии. Использовался сверхпроводящий провод  $\text{Cu/NbTi} = 1.4$ . В конструкции реализованы пассивные методы защиты при внезапном переходе в нормальное состояние за счет секционирования и вторичных связанных контуров. Требуемую однородность поля 0.5% обеспечивали применением железного ярма и дополнительных боковых обмоток. Криогеника соленоида основана на двух криокулерах Sumitomo HI. Соленоид и железное ярмо охлаждаются второй ступенью криокулера, с которой они соединены с помощью медных пластин. Подробно описана технология изготовления соленоида. Соленоид был испытан в погружном криостате с жидким гелием и собственным криостате. Его характеристики удовлетворяют требованиям экспериментальной станции. Полученное поле 7.3 Тл больше расчетного за счет переохладения криокулерами до 3.6 К. Магнитное поле измеряли как в погружном криостате при 4.2 К, так и в проектном криостате — результаты соответствовали проектным расчетам. Время охлаждения соленоида составляет 13 дней. Произошли только два перехода в нормальное состояние — при 5.6 и 7.3 Тл.

**Ключевые слова:** сверхпроводящий соленоид, терагерцовое излучение, косвенное охлаждение сверхпроводящего магнита, пассивная система защиты сверхпроводящего магнита, магнит с сильным магнитным полем.

DOI: 10.31857/S1028096023110079, EDN: MWQSH

### ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий соленоид будет использоваться на экспериментальной станции лазера на свободных электронах, работающей в Институте ядерной физики [1–3]. Особенности и актуальность экспериментов по терагерцовой спектроскопии, а также необходимость использования соленоида, генерирующего сильное магнитное поле с повышенной однородностью, обсуждали в [4–7].

Сверхпроводящий соленоид был спроектирован в соответствии с требованиями, предъявляемыми к экспериментам по терагерцовой спектроскопии [8]. Его основные параметры следующие. Он должен обеспечивать магнитное поле более 6 Тл в теплом канале диаметром 80 мм на длине 0.2 м с однородностью менее 0.5% в этом про-

странстве. Криогенная система на основе криокулеров необходима для удобства эксплуатации, поэтому конструкция магнита присоединена напрямую к криокулерам с помощью медных пластин. Для функционирования такой криогенной системы необходима только электроэнергия и чистая техническая вода.

### КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА

Принципиальное устройство магнита, состоящего из соленоида и железного ярма, на концептуальном уровне описано в [8]. Конкретный вид магнита и его компоновка при сборке показаны на рис. 1. Соленоид собран в собственном криостате, включающем вакуумную камеру, радиационные экраны, два криоохладителя, токовводы и железное ярмо. Токовводы состоят из резистив-

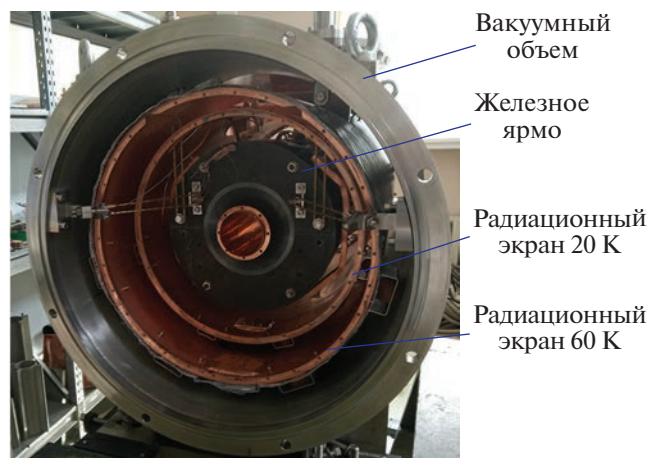


Рис. 1. Соленоид во время сборки и его компоненты.

ных латунных стержней оптимизированной длины и сечения и сверхпроводящих вставок из ВТСП-ленты. Вставки были произведены компанией SuperOx.

Для охлаждения магнита использовали два криокулера SRDK-408S2 и SRDK-408D2 производства Sumitomo HI. Максимальная охлаждающая мощность криокулеров составляла 1 Вт при 4.2 К, 14 Вт при 20 К и 85 Вт при 50 К.

Конструкция содержит два радиационных экрана, изготовленных из медных листов толщиной 3 мм. Их расчетная температура составляла ~60 и 20 К соответственно. Между внутренним диаметром соленоида и вакуумной камерой находился только радиационный экран 20 К. Радиационные экраны были термически соединены со ступенями криокулеров гибкими медными перемычками. Сборка радиационного экрана 60 К

поддерживается пластиковыми шариками, упирается в вакуумный объем. Таким же образом сборка экрана 20 К упирается в радиационный экран 60 К. Внешние поверхности радиационного экрана 60 К были покрыты 20 слоями многослойной суперизоляции. Материал экранов — медь М1.

Материал железного ярма — низкоуглеродистая сталь типа 08кп. Соленоид привинчен к железному ярму болтами только с одного торца, чтобы не допустить термонапряжений из-за разности в коэффициентах теплового расширения разнородных материалов. Магнит подвешен к вакуумному сосуду с помощью вертикальных и горизонтальных нитей, изготовленных из материала типа Кевлар (рис. 1).

В целом подход к проектированию криостата тот же, что и для сверхпроводящих вигглеров, реализованных авторами на протяжении многих лет [9]. Опыт работы при проектировании косвенно охлаждаемых сверхпроводящих магнитов был получен в [10] и на испытательном стенде.

## КОНСТРУКЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКИ

На этапе проектирования размеры сверхпроводящей обмотки и железного ярма оптимизировали с использованием программы ANSYS [11]. Основные параметры соленоида перечислены в табл. 1.

Для изготовления обмотки использовали композитный провод на основе сверхпроводника NbTi в медной матрице. Диаметр неизолированного провода составлял 0.87 мм, соотношение Cu/NbTi 1.43. Изолированный диаметр 0.92–0.93 мм. Критический ток провода при 5 Тл и 4.2 К составляет около 360 А. Количество жил в проводе NbTi 8920 при диаметре ~6 мкм. Общая длина провода около 4.2 км превышала имеющийся в наличии изготовленный провод в бобилах в два раза, поэтому обмотка была сращена только один раз и таким образом разделена на две секции. Эту стыковку секций осуществляли пайкой припоем ПОС-61 на длине ~40 см по внешней поверхности обмотки (рис. 2).

Провод намотан на медный цилиндр из технической меди М1. Перед намоткой провода поверхность цилиндра была покрыта изоляцией общей толщиной ~0.5 мм материалом типа СТЭФ-1. Фланцы медного цилиндра имеют канавки для укладки вводов—выводов провода и для пропитки эпоксидной смолой. После окончания намотки 20 слоев лист СТЭФ-1 толщиной 0.5 мм четыре раза обернулся вокруг внешней поверхности соленоида, оставив свободное пространство длиной

Таблица 1. Основные проектные параметры соленоида

| Параметр                                                                               | Значение |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Внутренний диаметр обмотки, мм                                                         | 101      |
| Длина обмотки, мм                                                                      | 500      |
| Теплый диаметр для размещения образцов, мм                                             | 80       |
| Число витков                                                                           | 11560    |
| Число витков (+ на торцах соленоида)                                                   | 20 + 2   |
| Пиковое поле на обмотке                                                                | 6.62     |
| Поле в центре соленоида                                                                | 6.5      |
| Ток в обмотке, А                                                                       | 236      |
| Отношение рабочего тока к критическому при 4.2 К ( $I_{\text{раб}}/I_{\text{кр}}$ ), % | 83       |
| Индуктивность, Гн                                                                      | 3.31     |
| Запасенная энергия, кДж                                                                | 92       |

80 мм для дополнительных боковых витков. Эти дополнительные витки были намотаны из второй бобины, т.е. без дополнительного сращивания. Для ровной намотки во внешних листах из СТЭФ-1 были прорезаны винтовые канавки (рис. 2). Под эти листы из СТЭФ-1 была вложена медная фольга толщиной 1 мм для фиксации термодатчика.

После завершения процесса намотки и пайки секций соленоид был пропитан эпоксидным компаундом, состоящим из порошка оксида алюминия с размером зерна  $\sim 5$  мкм и эпоксидной смолы типа ЭД-16. Для этой цели соленоид помещали в резиновый мешок, заполняли компаундом и выдерживали при температуре  $90^\circ\text{C}$  и давлении  $\sim 18$  бар в течение нескольких часов. Эта технология также использовалась в других работах и показала свою эффективность [12].

Соленоид был собран с железным ярмом так, как показано на рис. 3. Каждый фланец медного цилиндра соленоида имеет четыре медные пластины, соединенные со второй ступенью криокулера посредством гибких медных пластин.

### ЗАЩИТА СОЛЕНОИДА

При внезапном переходе в нормальное состояние в соленоиде могут возникать высокие температуры и электрическое напряжение, которые могут привести к разрушению конструкции. Для минимизации и устранения этих эффектов используется защита сверхпроводящих устройств, направленная на обеспечение однородного распределения температуры и выводе запасенной энергии на внешние элементы.

Защита данного соленоида основана на пассивных методах, а именно было использовано секционирование обмотки, а также в конструкции были задействованы вторичные цепи. Секционирование соленоида осуществляли с помощью диодов (рис. 3, 4). Диодные шунты были установлены на каждой секции соленоида. Секция содержала сверхпроводящий провод обмотки длиной  $\sim 2.2$  км. Хотя секций всего две, такая схема будет способствовать более равномерному распределению запасенной энергии в процессе перехода соленоида в нормальное состояние.

Вторичные цепи применяли по теории, описанной в [13, 14]. В данной конструкции соленоида в качестве вторичных цепей рассматривали медный цилиндр, радиационный экран 20 К и железное ярмо. Вторичные цепи позволяют вывести часть запасенной энергии из цепи источник питания—соленоид, а также существенно снижают электрическое напряжение в цепи.



Рис. 2. Соленоид после пропитки эпоксидным компаундом.



Рис. 3. Сборка соленоида перед установкой в собственный криостат.

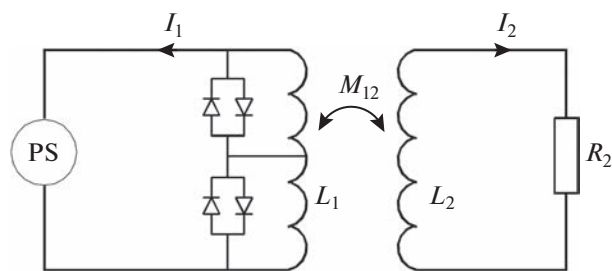


Рис. 4. Электрическая схема защиты соленоида при переходе в нормальное состояние. Параметры  $L_2$  и  $R_2$  характеризуют вторичный контур.

С помощью программы ANSYS была рассчитана поперечная скорость распространения нормальной зоны вдоль сверхпроводящего провода, которая составила  $\sim 1.5$  м/с. Медный цилиндр ускорит межвитковую скорость распространения нормальной зоны за счет прямого нагрева близлежащих витков соленоида (quench-back effect). В расчетах по аналитическим формулам был оценен эффект от вторичных контуров [14]. В результате анализа переходного процесса была получена температу-

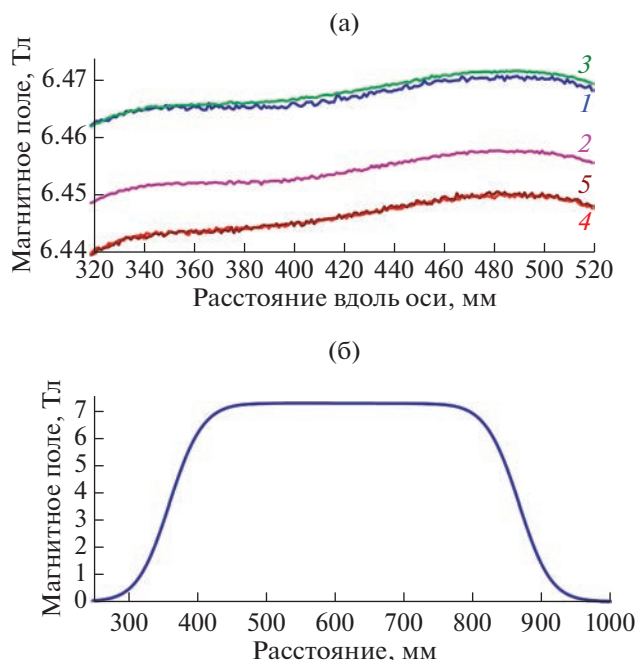


Рис. 5. Результаты измерений магнитного поля пятью датчиками Холла (1–5) в соленоиде во время погружных испытаний при 240 А (а) и в собственном криостате при 270 А (б).

ра горячей точки менее 120 К, что говорит о хорошей защите соленоида.

## ИСПЫТАНИЯ

Испытания магнита происходили в ванне с жидким гелием при 4.2 К и в собственном криостате. В ванне с жидким гелием соленоид был испытан до 6.5 Тл при низкой скорости ввода тока  $\sim 0.05\text{--}0.1$  А/с. Был только один тренировочный переход в нормальное состояние во время первой запитки соленоида при токе 205 А, соответствующем  $\sim 5.6$  Тл. Карту поля измеряли при нескольких значениях тока с помощью пяти датчиков Холла, установленных по радиусу соленоида и сканировавших вдоль оси соленоида. Результаты измерений представлены на рис. 5 — они удовлетворяют требованиям к магниту.

Собственный криостат был оборудован также источником питания, датчиками температуры и системой управления, позволяющей выполнять все измерения и обнаружить переход в нормальное состояние. Датчики температуры для диапазона 3–300 К были установлены на внешнем слое обмотки, на медном цилиндре, железном ядре и на второй ступени криокулера. Датчики для диапазона 20–300 К установлены на первых ступенях криокулеров, токовводах, радиационных экранах.

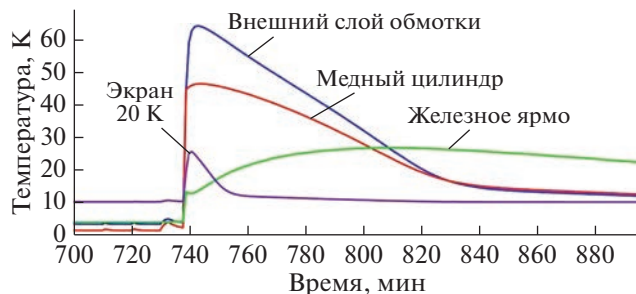


Рис. 6. Изменение температуры в элементах магнита после перехода в нормальное состояние.

После завершения сборки соленоида криостат охлаждался криокулерами до температуры ниже 4.2 К за 13 сут. Тяжелое железное ядро определяло время охлаждения. Температура соленоида перед вводом тока составляла  $\sim 3.6$  К. Ввод тока осуществляли до 7.3 Тл без перехода в нормальное состояние. Магнитное поле измеряли при нескольких величинах тока, и некоторые результаты показаны на рис. 5, что соответствует требованиям к магниту. Соленоид испытывали в течение нескольких дней для измерений магнитного поля и выравнивания соленоида относительно оси криостата.

Чтобы быть уверенным, что соленоид будет работать на станции терагерцовой спектроскопии, было решено спровоцировать переход в нормальное состояние за счет ввода тока с высокой скоростью от значения 7 Тл. В этих условиях соленоид перешел в нормальное состояние при 7.3 Тл, что соответствует току 271 А и отношению рабочего тока к критическому  $I_{\text{раб}}/I_{\text{кр}}$  при 4.2 К  $\sim 95\%$ , а температура соленоида была ниже 4.0 К. Температурное поведение элементов соленоида в течение перехода показано на рис. 6. После этого соленоид был запитан до 7 Тл, чтобы продемонстрировать его работоспособность.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На проектные параметры соленоид вышел после одного тренировочного перехода в нормальное состояние. К таким результатам привели несколько условий проектирования и производства. Обмотка, состоящая из однородных материалов, в основном из меди, и используемый эпоксидный компаунд с порошком предотвращают большие каскадные напряжения на границе раздела различных материалов. Железное ядро существенно снижает осевые усилия, которые могут привести к отслоению катушки от фланцев медного каркаса. В такой ситуации сверхпроводящая обмотка находилась в основном под действием окружающих напряжений, которые оцениваются в  $\sim 50$  МПа, что

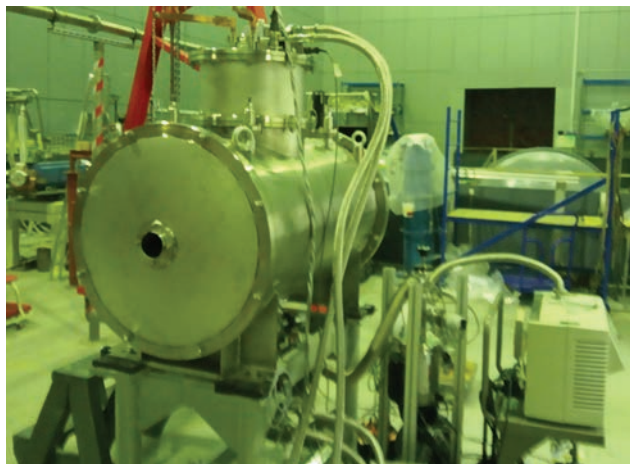


Рис. 7. Вид криостата во время испытаний.

ниже прочности эпоксидного компаунда  $\sim 100$  МПа при низкой температуре. Рабочее магнитное поле соленоида было решено установить на уровне 7 Тл. Общий вид криостата во время испытаний показан на рис. 7.

Температуры радиационных экранов составляли  $\sim 40$  и  $10$  К из-за консервативного подхода при проектировании криостата. Анализ перехода в нормальное состояние был выполнен аналогично предыдущему опыту авторов [15]. Он показал, что при переходе с полем 7.3 Тл около 15% запасенной энергии рассеивается в экране 20 К и железном ярме. Быстрый рост температуры медного цилиндра, радиационного экрана 20 К и железного ярма свидетельствует о появлении вихревых токов в этих элементах, а значит, часть запасенной энергии выделилась на них. Количество выделившейся энергии можно оценить по разности значений энтальпии в этих элементах начиная от 4 К до температуры, резко возросшей за время менее 1 с (рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соленоид с косвенным охлаждением за счет криокулеров продемонстрировал свою работоспособность при 7 Тл и продемонстрировал требуемую однородность магнитного поля в рабочей области. Время охлаждения соленоида составляет 13 дней. Защита при переходе в нормальное состояние была протестирована и проанализирована только один раз во время спровоцированного перехода при 7.3 Тл. Соленоид готов к работе.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность И. Гургуце и В. Казакову за сборку криостата и усовер-

шенствование его конструкции, Г. Верховоду и Ю. Тойкичеву за сборку соленоида с системы защиты и А. Поздееву за изготовление соленоида. Работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

**Конфликт интересов:** авторы утверждают, что у них отсутствует конфликт интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kubarev V., Chesnokov E., Koshlyakov P. // Proc. 37th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2012, Wollongong, Australia, September 23–28, 2012. Thu-C-2-4.
2. Kubarev V.V., Chesnokov E.N., Koshlyakov P.V. // Proc. 38th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013, Mainz on the Rhine, 2013. Tu5-5.
3. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 261107.
4. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V., Kulipanov G.N. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 131109.
5. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V., Kulipanov G.N. // Laser Phys. Lett. 2013. V. 10. P. 055701.
6. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Koshlyakov P.V. // Laser Phys. Lett. 2021. V. 18. Iss. 8. P. 085205.
7. Chesnokov E.N., Kubarev V.V., Krasnoperov L.N., Koshlyakov P.V. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. V. 22. P. 20248.
8. Bragin A.V., Khrushchev S.V., Kubarev V.V., Mezencev N.A., Tsukanov V.M., Sozinov G.I., Shkaruba V.A. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 82.
9. Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V., Shkaruba V., Syrovatin V., Tsukanov V. // Phys. Rev. Accel. Beams. Proc. IPAC-2014. WEPRI091. P. 4103. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-WE-PRI091>
10. Bragin A.V., Bernhard A., Casalbuoni S., Fajardo L.G., Ferracin P., Grau A., Gusev Ye.A., Hillenbrand S., Khrushchev S.V., Poletaev I.V., Shkaruba V.A., Schoerling D., Syrovatin V.M., Tarasenko O.A., Tsukanov V.M., Volkov A.A., Zolotarev K.V., Mezentsev N.A. // IEEE Trans. App. Supercond. 2016. V. 26. Iss. 4. P. 4102504.
11. <https://www.ansys.com/>
12. Schoerling D., Antoniou F., Bernhard A., Bragin A., Karppinen M., Maccaferri R., Mezentsev N., Papaphilippou Y., Peiffer P., Rossmann R., Rumolo G., Russenschuck S., Vobly P., Zolotarev K. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2012. V. 15. № 4. P. 042401.
13. Green M.A. // Cryogenics. 1984. V. 24. Iss. 1. P. 3.
14. Green M.A. // Cryogenics. 1984. V. 24. Iss. 12. P. 659.
15. Bragin A.V., Barkov L.M., Bashtovoj N.S., Grebenuk A.A., Karpov S.V., Okhapkin V.S., Pivovarov S.G., Popov Yu.S., Ruban A.A., Khazin B.I. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2010. V. 20. P. 2336.

## Superconducting Solenoid (7 T) Indirectly Cooled by Cryocoolers for THz Radiation

A. V. Bragin<sup>1, \*</sup>, A. A. Volkov<sup>1, 2</sup>, V. V. Kubarev<sup>1</sup>, N. A. Mezentsev<sup>1, 2</sup>, O. A. Tarasenko<sup>1</sup>,  
S. V. Khrushchev<sup>1, 2</sup>, V. M. Tsukanov<sup>1, 2</sup>, and V. A. Shkaruba<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*Borisevsk Institute of Catalysis SB RAS (SRF "SKIF"), Novosibirsk, 630559 Russia*

*\*e-mail: bragin@inp.nsk.su*

The test results and performance characteristics of an indirectly cryocooled superconducting solenoid to be used at the THz spectroscopy experimental station of free-electron laser at the Institute of Nuclear Physics, are presented. The superconducting solenoid with a winding diameter of 102 mm and a length of 0.5 m was designed for a magnetic field of 6.5 T. The warm bore diameter of 80 mm is available for THz spectroscopy experiments. The superconducting wire Cu/NbTi = 1.4 was used. The design implements passive protection methods due to sectioning and secondary connected circuits in case of a sudden quench. The required field uniformity of 0.5% was ensured by using an iron yoke and additional side windings. The cryogenics of the solenoid is based on two Sumitomo HI cryocoolers. The solenoid and iron yoke are cooled by the second stage of the cryocooler via copper links. The manufacturing technology of the solenoid is described in detail. The solenoid was tested in a liquid helium bath and in its own cryostat. Its characteristics meet the requirements of the experimental station. The obtained field of 7.5 T is greater than the designed one due to overcooling up to 3.6 K. The magnetic field was measured both in a bath cryostat and in a design cryostat; the results corresponded to the design calculations. The solenoid cooling time is 13 days. The quench happened only twice, at 5.6 and 7.5 T.

**Keywords:** superconducting solenoid, terahertz radiation, indirectly cooled superconducting magnet, passively protected superconducting magnet, high magnetic field magnet.