

PACS: 07.55.Db, 84.32.Hh, 84.40.Ik, 84.71.Ba, 84.71.Mn

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

## УСТОЙЧИВЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ПОДВЕС СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО СОЛЕНОИДА В КРИОСТАТЕ

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

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2020 года

*Разработан бесконтактный подвес сверхпроводникового соленоида (СПС) в гелиевом криостате при воздействии на соленоид внешнего магнитного окружения. В криомагнитной системе с теплым горизонтальным каналом в составе криостата, состоящего из корпуса, гелиевой и азотной емкостей, радиационных экранов и СПС, установленного в гелиевой емкости, для компенсации воздействующих на СПС механических усилий на трубе теплового канала соосно и симметрично относительно центра СПС установлены и жестко закреплены три тонкостенные цилиндрические вставки из магнитного материала с высоким значением индукции насыщения. Одна вставка установлена в центре СПС, а две другие одинаковых размеров – со стороны торцов СПС за радиационным экраном.*

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый соленоид, гелиевый криостат, механические усилия, труба теплового канала криостата, вставка из магнитного материала, градиент магнитного поля, сила магнитного взаимодействия, однородность поля

Криомагнитная система для возбуждения сильного магнитного поля состоит из металлического криостата, сверхпроводникового соленоида и устройств, обеспечивающих ее функционирование. Криостат содержит гелиевую емкость, в которой установлен СПС, азотную емкость, один или несколько радиационных экранов и корпус. Гелиевая и азотная емкости в отдельности подвешены на двух-трех тонкостенных трубках-горловинах. Радиационные экраны охватывают гелиевую емкость и крепятся к горловинам криостата. Таким образом, на тонкостенных горловинах длиной 0.5–0.7 м подвешены гелиевая емкость с соленоидом и радиационные экраны, общий вес которых может достигать нескольких десятков и даже сотен килограммов.

При вводе тока в обмотку СПС последний создает магнитное поле в рабочем отверстии (теплом канале) и за криостатом – так называемое поле рассеяния.

В поле рассеяния СПС могут находиться приборы и оборудование, содержащие магнитные материалы, в результате чего между ними и соленоидом возникают силы магнитного взаимодействия. Эти силы могут сместить соленоид с гелиевой емкостью из исходного рабочего положения, что способно привести к деформации гелиевых горловин, в результате чего может

произойти замыкание радиационного экрана с гелиевой емкостью, что ухудшит характеристики криостата. Примером внешнего магнитного окружения является установленная в колесах криомагнитного сепаратора ферромагнитная матрица, которая находится в магнитном поле рассеяния СПС [1]. Внешними силами также является сила тяжести гелиевой емкости с СПС, которая проявляется при наклонах и перемещениях криомагнитной системы.

Известно [2], что к СПС криомагнитной системы для лазера на циклотронном резонансе предъявляются жесткие требования, а именно: параллельное смещение оси соленоида по отношению к оси теплого канала криостата не должно превышать 0.1–0.5 мм, а угловые смещения осей – не более 0.5°. Для обеспечения стабильного положения гелиевой емкости с СПС в криостате устанавливаются опоры из текстолита или оргстекла либо металлические растяжки. В криомагнитной системе [3] в качестве опор применены растяжки из стеклопластика.

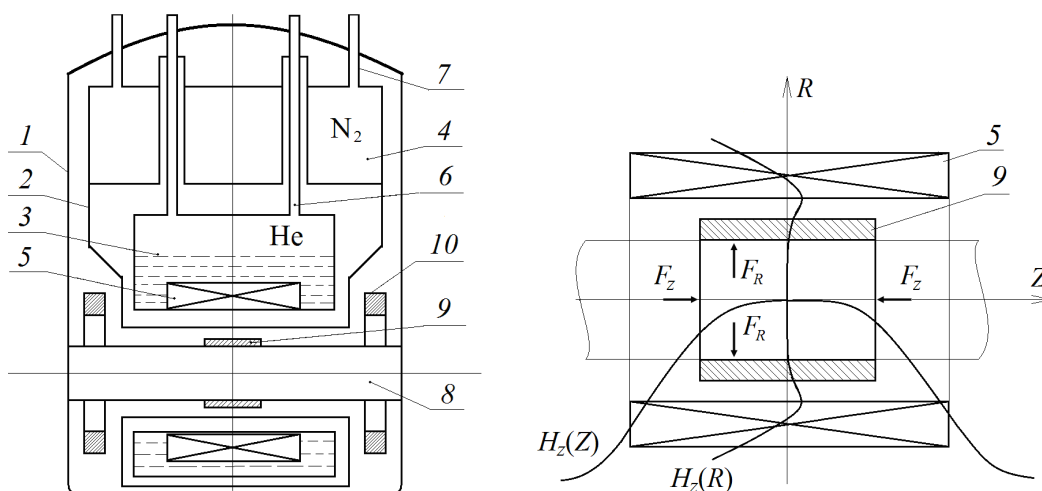
Недостатком таких систем крепления гелиевой емкости с СПС в криостате является усложнение его конструкции, а также снижение экономичности работы за счет потерь жидкого гелия при подводе тепла по опорам и растяжкам к гелиевой емкости от азотного экрана с температурой  $T = 80$  К, а иногда и от корпуса с  $T = 300$  К. Основная трудность, которую приходится преодолевать при использовании опор и растяжек, заключается в совмещении таких исключаящих друг друга требований, как обеспечение жесткости и прочности опор и растяжек, с одной стороны, и тепловая развязка по ним – с другой.

С целью устранения указанных недостатков, а также повышения экономичности криомагнитной системы в условиях воздействия на СПС механических усилий нами внесены новые конструктивные решения. В криомагнитной системе с теплым горизонтальным каналом и металлическим криостатом на трубе теплого канала соосно и симметрично относительно центра СПС установлены и жестко закреплены три тонкостенные цилиндрические вставки из магнитного материала с высоким значением индукции насыщения. Одна из них установлена в центре СПС, а две другие одинаковых размеров – со стороны торцов СПС за радиационным экраном (рис. 1).

Центральная вставка используется для обеспечения устойчивости магнитного подвеса гелиевой емкости с СПС в направлении его оси (и теплого канала). Это достигается за счет того, что между намагниченной в поле соленоида вставкой и СПС возникает сила магнитного взаимодействия, которая пропорциональна намагниченности материала вставки и градиенту магнитного поля вдоль оси СПС. Устойчивость подвеса обеспечивается тем, что при воздействии внешних сил усилия от СПС посредством вставки и трубы теплого канала передаются на прочный металлический корпус криостата.

Две другие вставки в первую очередь служат для обеспечения устойчивости подвеса гелиевой емкости с СПС в радиальном направлении. Это достигается тогда, когда градиент магнитного поля в радиальном направлении в области расположения вставок (и соответственно действующая на них сила)

будет направлен к оси соленоида. Расчеты пространственного распределения магнитного поля СПС показывают, что такое направление радиального градиента имеет место в области магнитного поля, расположенной со стороны торцов СПС на расстоянии от оси не менее радиуса отверстия соленоида.



**Рис. 1.** Схема криомагнитной системы: 1 – корпус криостата, 2 – радиационный экран, 3 – гелиевая емкость, 4 – азотная емкость, 5 – сверхпроводниковый соленоид, 6 – гелиевая горловина, 7 – азотная горловина, 8 – труба теплого горизонтального канала, 9 – центральная вставка, 10 – крайние вставки

**Рис. 2.** Профили магнитного поля  $H_z$  вдоль оси  $Z$  и радиуса  $R$  соленоида, а также силы магнитного взаимодействия вставки с соленоидом

Сила взаимодействия намагниченной вставки с соленоидом в магнитном поле напряженностью  $H$  определяется выражением

$$F = (M / 4\pi) \text{grad}H \cdot V, \quad (1)$$

где  $F$  – сила магнитного взаимодействия,  $M$  – намагниченность материала вставки,  $\text{grad}H$  – градиент магнитного поля,  $V$  – объем вставки.

На рис. 2 показаны расположение центральной вставки в отверстии СПС, а также профили магнитного поля  $H_z$  вдоль оси  $Z$  и вдоль радиуса соленоида  $R$ . Из хода кривых видно, что в центральной области соленоида максимум поля вдоль оси  $Z$  имеет место в его геометрическом центре (кривая  $H_z(Z)$ ), а в радиальном направлении – на обмотке соленоида (кривая  $H_z(R)$ ). Кроме того, выпуклости профилей поля противоположны, а это значит, что и градиенты поля вдоль оси  $Z$  и радиуса  $R$  имеют противоположные направления. Также необходимо отметить, что величина радиальной составляющей поля СПС  $H_r(Z)$  в области расположения этой вставки незначительная и ею можно пренебречь.

В магнитном поле СПС вставка намагничивается и между ними возникает сила магнитного взаимодействия. Со стороны соленоида на вставку будут

действовать две силы: бóльшая по величине сила  $F_z$ , направленная вдоль оси  $Z$  к центру СПС и определяемая величиной градиента магнитного поля  $\text{grad}H_z(z)$ , и меньшая по величине сила  $F_R$ , направленная вдоль радиуса  $R$  и определяемая градиентом поля  $\text{grad}H_r(R)$ .

Следует отметить, что у наиболее часто используемых СПС (с приведенной длиной  $\beta = L/D > 2.5$ , где  $L$  и  $D$  – соответственно длина и внутренний диаметр соленоида)  $\text{grad}H_z(z)$  существенно больше  $\text{grad}H_z(R)$ , поэтому и сила  $F_z$  больше силы  $F_R$ .

Если оси СПС и центральной вставки совпадают, то на последнюю по круговой ее поверхности в радиальном направлении со стороны соленоида будут действовать одинаковые по величине радиальные силы, и результирующая этих сил будет равна нулю. Поэтому вставка и СПС в радиальном направлении будут находиться в устойчивом положении. Однако, если оси вставки и СПС не совпадают, то результирующая радиальная сила будет отлична от нуля и будет стремиться сместить вставку в радиальном направлении к обмотке СПС – в сторону более сильного магнитного поля. В этом случае вставка и СПС в радиальном направлении будут находиться в неустойчивом положении.

Для устранения неустойчивости в радиальном направлении, а также для увеличения силы магнитного взаимодействия с СПС в направлении его оси дополнительно к центральной используются две одинаковые вставки, установленные симметрично относительно центра соленоида со стороны его торцов за радиационным экраном криостата.

На рис. 3 представлена зависимость радиальной составляющей магнитного поля  $H_r(R)$  от радиальной координаты  $R$  соленоида. Необходимо отметить, что в области расположения двух вставок радиальная  $H_r(R)$  и осевая  $H_z(z)$  составляющие поля соленоида соизмеримы по величине и ни одной из них пренебрегать нельзя. Из рисунка следует, что с увеличением радиуса (удалением от оси СПС) до некоторого значения  $R_0$  радиальная составляющая поля  $H_r(R)$  соленоида возрастает, а это значит, что  $\text{grad}H_r(R)$  направлен по радиусу от оси СПС. Если вставку установить в этой области поля, то на нее будет действовать сила, стремящаяся сместить ее в радиальном направлении от оси, поэтому вставка будет находиться в неустойчивом положении. Однако, начиная с радиуса  $R_0$ , радиальная составляющая поля  $H_r(R)$  уменьшается,  $\text{grad}H_r(R)$  в этой области поля будет направлен к оси СПС и соответ-

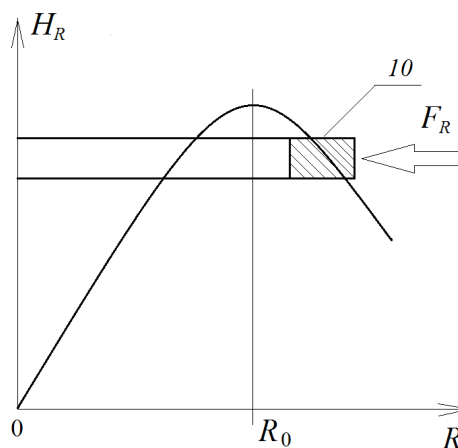


Рис. 3. Профиль радиальной составляющей магнитного поля  $H_R$  вдоль радиуса  $R$

ственно будет создавать радиальную силу, которая также будет направлена к оси соленоида. В этой области магнитного поля вставка и СПС будут находиться в устойчивом положении. Именно в этой области магнитного поля и располагают две вставки.

Кроме того, в этой области поля  $\text{grad}H_z(z)$  и соответственно сила  $F_z$  также направлены к центру соленоида, тем самым увеличивая силу  $F_z$ , создаваемую центральной вставкой. Иными словами, силы взаимодействия  $F_z$  центральной вставки и двух крайних с СПС вдоль оси  $Z$  направлены в одну сторону и складываются.

Силы магнитного взаимодействия  $F_R$  соленоида с центральной и двумя крайними вставками в радиальном направлении направлены навстречу друг другу, поэтому они вычитаются. Однако в силу того, что градиент магнитного поля  $\text{grad}H_r(R)$  в области расположения двух крайних вставок больше соответствующего градиента в области расположения центральной вставки, результирующая сила взаимодействия центральной и крайних вставок с соленоидом в радиальном направлении будет направлена к оси СПС, что обеспечит устойчивость вставок в радиальном направлении.

Таким образом, предложенная система бесконтактного подвеса СПС упрощает конструкцию и повышает экономичность криостата за счет уменьшения потерь жидкого гелия в связи с отсутствием системы упоров и растяжек.

Предложенное техническое решение по обеспечению устойчивого подвеса СПС в криостате при воздействии внешних сил может быть реализовано и в криомагнитной системе с теплым вертикальным каналом.

Если СПС используется для создания однородного магнитного поля, то поле намагниченности центральной вставки может ухудшить его однородность. С целью исключения этого явления центральная вставка выполняется строго заданных размеров.

Известно [4], что распределение магнитного поля намагниченности внутри полого цилиндра вдоль оси  $Z$  описывается выражением

$$H_z(r, \varphi) = M_z \left[ F_0(\alpha, \beta) + F_2(\alpha, \beta) P_2(\cos \varphi) \left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 + F_4(\alpha, \beta) P_4(\cos \varphi) \left( \frac{r}{\alpha} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где  $M_z$  – намагниченность материала;  $\alpha = D/d$  – приведенный наружный диаметр полого цилиндра (где  $D, d$  – соответственно его наружный и внутренний диаметры);  $\beta = l/d$  – приведенная длина полого цилиндра (где  $l$  – его длина);  $P_{2n}(\cos \varphi)$  – полиномы Лежандра, описывающие зависимость членов разложения ряда от полярного угла  $\varphi$ ;

$$F_0(\alpha, \beta) = \beta \left[ \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right]; \quad F_2(\alpha, \beta) = \frac{3\beta}{2} \left[ \frac{1}{(1 + \beta^2)^{5/2}} - \frac{1}{(\alpha^2 + \beta^2)^{5/2}} \right];$$

$$F_4(\alpha, \beta) = \frac{5\beta}{8} \left[ \frac{4\beta^2 - 3}{(1 + \beta^2)^{9/2}} - \frac{\alpha^2(4\beta^2 - 3\alpha^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^{9/2}} \right].$$

Однородность магнитного поля намагниченности полого цилиндра определяется членами  $F_2(\alpha, \beta)$ ,  $F_4(\alpha, \beta)$  и т.д., при этом  $F_2(\alpha, \beta) > F_4(\alpha, \beta) > \dots$ . Если полый цилиндр имеет приведенные размеры  $\alpha$  и  $\beta$ , удовлетворяющие соотношению

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha^2 - \alpha^{4/5}}{\alpha^{4/5} - 1}},$$

то он создает однородное магнитное поле намагниченности в силу того, что наибольший по абсолютной величине квадратичный член ряда  $F_2(\alpha, \beta)$  равен нулю. Однородность магнитного поля СПС при использовании такой цилиндрической вставки не будет ухудшаться.

По предложенному техническому решению была разработана криомагнитная система, состоящая из гелиевого криостата со сквозным горизонтальным теплым каналом диаметром 65 мм и соленоида с диаметром отверстия 100 мм, внешним диаметром 180 мм и длиной 250 мм. Центральная вставка имеет диаметр отверстия 70 мм, внешний диаметр 76 мм, длину 120 мм. При индукции 7 Т градиент магнитного поля вдоль оси СПС в области расположения вставки равен 7 Т/м, а в радиальном направлении – 1.1 Т/м. Расчеты показали, что сила магнитного взаимодействия вставки с соленоидом вдоль оси составляет 1100 Н и направлена к его центру, а сила взаимодействия в радиальном направлении равна 160 Н и направлена от оси в сторону обмотки соленоида.

Две одинаковые вставки, установленные на трубе горизонтального канала криостата со стороны торцов СПС, имеют диаметр отверстия 110 мм, внешний диаметр 120 мм и длину 60 мм. Сила магнитного взаимодействия каждой вставки с СПС в осевом направлении составляет 340 Н, а в радиальном – 560 Н. Причем последняя направлена от обмотки к оси соленоида. Отсюда суммарная сила взаимодействия центральной и двух крайних вставок с СПС в осевом направлении равна 1440 Н, а в радиальном – 400 Н. Последняя также направлена к оси СПС, что обеспечивает устойчивость вставок и СПС в радиальном направлении. В расчетах индукцию насыщения материала вставок принимали равной 2 Т.

### Выводы

1. Представленная разработка бесконтактного подвеса сверхпроводникового соленоида в гелиевом криостате при воздействии на соленоид внешних сил упрощает конструкцию и повышает экономичность гелиевого криостата.
2. Для компенсации воздействующих на СПС механических усилий на трубе теплового канала криостата соосно и симметрично относительно центра

СПС установлены и жестко закреплены три тонкостенные цилиндрические вставки из магнитного материала. При этом одна установлена в центре СПС, а две другие вставки одинаковых размеров – со стороны торцов СПС за радиационным экраном.

3. С целью исключения влияния поля намагниченности центральной вставки на однородность магнитного поля соленоида наружный диаметр и длина вставки выбираются строго заданных размеров.

1. *Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк*, Труды РАНМИ № 4, 105 (2017).
2. *Т.В. Бородачева* и др., в кн.: Гиротрон, А.В. Гапонов-Грехов (ред.), ИПФ АН СССР, Горький (1981), с. 229–235.
3. *П.Н. Постол, Е.А. Дворников, Д.В. Варюхин*, ФТВД **23**, № 4, 128 (2013).
4. *Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк*, Вестник ДонНТУ № 2, 23 (2017).

*D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik, L.N. Prokof'eva, D.O. Fedyuk*

#### STABLE CONTACTLESS SUSPENDER OF A SUPERCONDUCTING SOLENOID IN A CRYOSTAT

A contactless suspender of a superconducting solenoid (SCS) in a helium cryostat under the exposition to external magnetic environment is designed. Three thin-walled cylindrical inserts made of a magnetic material characterized by high induction of saturation are positioned and stiffened in a cryomagnetic system with a warm horizontal channel that is a part of the cryostat composed by the casing, helium and nitrogen containers, radiation shells and the SCS located in the helium container in order to compensate mechanical forces applied to the tube of the warm channel. One insert is located at the center of SCS and the rest of them of the same size are positioned behind the radiation shells at the edges of the SCS.

**Keywords:** superconducting solenoid, helium cryostat, mechanical forces, tube of the warm channel of the cryostat, insert of magnetic material, magnetic field gradient, force of magnetic interaction, field uniformity

**Fig. 1.** Scheme of the cryomagnetic system: 1 – cryostat casing, 2 – radiation shell, 3 – helium container, 4 – nitrogen container, 5 – superconducting solenoid, 6 – helium neck, 7 – nitrogen neck, 8 – tube of the warm horizontal channel, 9 – central insert, 10 – edge inserts

**Fig. 2.** Magnetic field profiles  $H_z$  along  $Z$  axis and radius of the solenoid  $R$ , and the forces of magnetic interaction between an insert and the solenoid

**Fig. 3.** Profile of the radial component of magnetic field  $H_R$  along radius  $R$