

PACS: 82.80.Ej

П.Н. Постол, Е.А. Дворников, Д.В. Варюхин

## КРИОСТАТ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТОВ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, 83114, г. Донецк, Украина

Статья поступила в редакцию 15 августа 2013 года

*Спроектирован и изготовлен криостат для трех сверхпроводниковых магнитов с вертикальными теплыми каналами (расположенными в одной гелиевой емкости), работающий с наклоном до 15°.*

**Ключевые слова:** криостат, сверхпроводниковый магнит, гелиевая емкость, азотная емкость, радиационный экран, вертикальный теплый канал

*Спроектвано та виготовлено кріостат для трьох надпровідних магнітів з вертикальними теплими каналами (розташованими в одному гелієвому резервуарі), працюючий при нахилі до 15°.*

**Ключові слова:** кріостат, надпровідний магніт, гелієвий резервуар, азотний резервуар, радіаційний екран, вертикальний теплий канал

В настоящее время существует большое количество разнообразных криостатов для проведения экспериментов при низких температурах [1–3]. Все они изготавливаются из тонкостенных оболочек цилиндрической и сферической формы с целью иметь минимальную поверхность при заданном объеме и обладать повышенными прочностными свойствами при минимальном весе. Криостаты со сверхпроводниковыми магнитами отличаются тем, что для их надежной работы сверхпроводниковый магнит должен быть постоянно погружен в жидкий криоагент (гелий). Поэтому основной запас рабочей жидкости располагают над сверхпроводниковыми магнитами, что обуславливает габариты гелиевой емкости и криостата по высоте.

Существуют конструкции сверхпроводниковых магнитов, работающих с пониженным уровнем жидкого гелия относительно их верхнего уровня [4]. В этом случае эффективнее расходуется жидкий гелий, но растут массогабаритные характеристики криомагнитных установок по диаметру из-за установленных в их обмотку теплоотводов.

Отличительными особенностями конструкции представляемого криостата являются:

– наличие трех сверхпроводниковых магнитов, расположенных в одной гелиевой емкости;

- наличие трех вертикальных теплых каналов;
- возможность работать с наклоном до  $15^\circ$ .

Для реализации поставленных требований были приняты дополнительные конструкторские решения, отличные от традиционных криостатов.

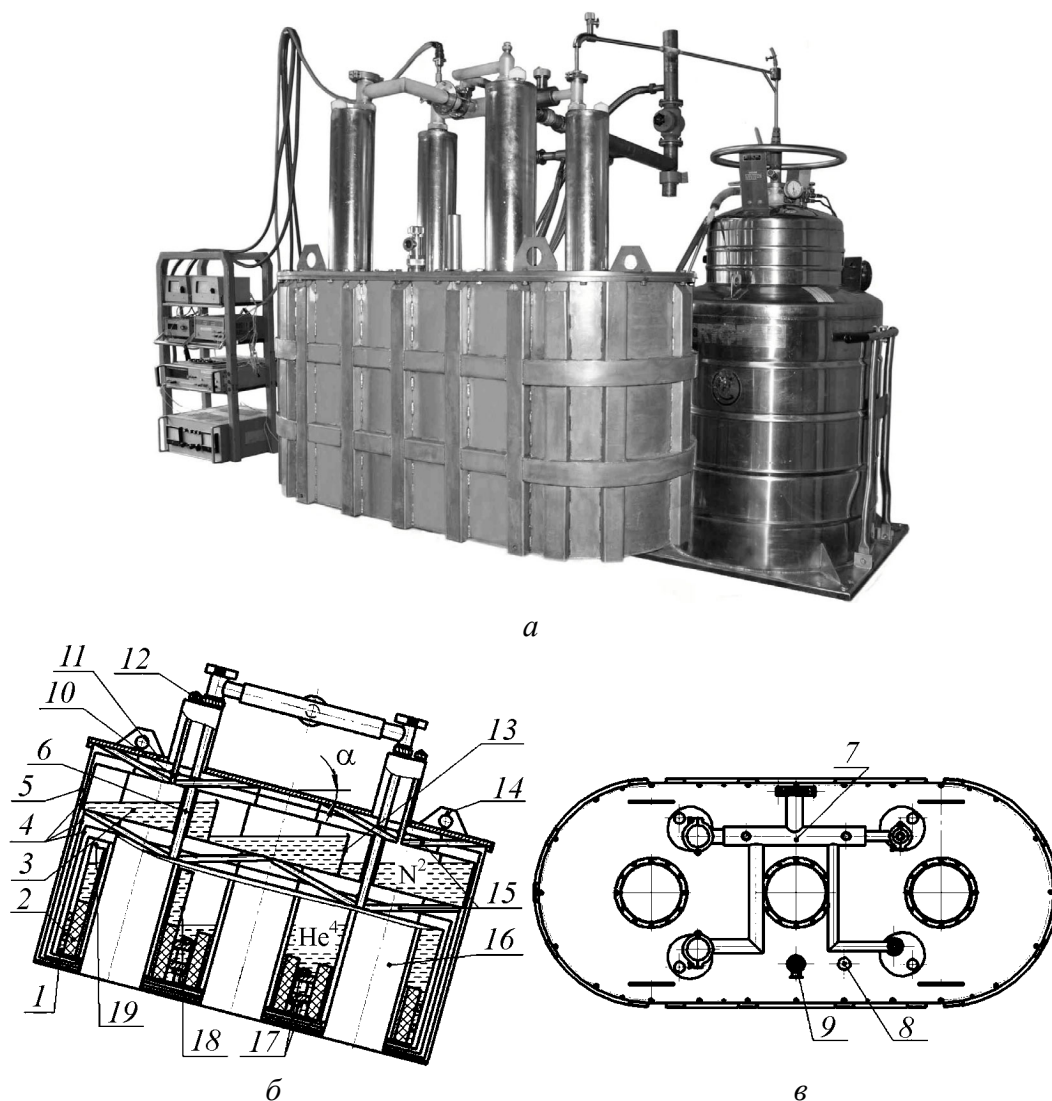
Наличие трех сверхпроводниковых магнитов, расположенных в одной гелиевой емкости вдоль продольной оси, предопределило ее форму – параллелепипед с двумя овальными короткими гранями. Нетрадиционная внешняя форма криостата требует дополнительного упрочнения по сравнению с криостатами цилиндрической или сферической формы. Упрочнение элементов конструкции криостата обычно осуществляется за счет их утолщения, что приводит к увеличению веса и перерасходу материала. В предлагаемом криостате применены конструкторские решения, позволяющие использовать тонкостенные оболочки, подкрепленные ребрами жесткости из гнутого профиля, что уменьшило вес криостата. Наличие трех сверхпроводниковых магнитов, расположенных в одной гелиевой емкости, потребовало установки элементов, компенсирующих усилия (до 20 t) магнитного взаимодействия между ними.

Вертикальные теплые каналы, проходящие вдоль оси магнитного поля в каждом сверхпроводниковом магните, установлены так, что исполняют роль компенсаторов атмосферного давления, действующего на верхний и нижний плоские фланцы криостата (создаваемое усилие до 16 t).

Наклон криостата до  $15^\circ$  по продольной оси приводит к перетеканию жидкого гелия и азота в наклоненную сторону, что, в свою очередь, вызывает смещение центра масс азотного и гелиевого резервуаров и возникновение динамических нагрузок, которые провоцируют повышение испарения жидкого гелия. Для того, чтобы сверхпроводниковый магнит, оказывающийся в верхней части гелиевой емкости, не выходил из жидкого гелия, этот магнит помещен в собственную локальную емкость, которая позволяет удерживать гелий от перетекания при наклонах, обеспечивая надежную работу криостата.

Медные радиационные экраны, установленные в криостате, охватывая гелиевую емкость со сверхпроводниковыми магнитами, образуют параллельные поверхности. В параллельных проводниках магнитным полем наводятся токи Фуко, приводящие к их силовому взаимодействию. В криостатах с экранами цилиндрической или сферической формы силовое взаимодействие не опасно, так как они обладают повышенной прочностью по сравнению с экранами плоской формы. В нашем случае радиационные экраны с двух сторон выполнены в виде плоских граней прямоугольного параллелепипеда, и их силовое взаимодействие может привести к нежелательным тепловым контактам. Поэтому конструктивно все радиационные экраны выполнены так, чтобы избежать появления токов Фуко, приводящих к нежелательным тепловым контактам, которые увеличивают расход криогенных жидкостей.

Решение этих вопросов позволило создать азотно-гелиевый криостат для сверхпроводниковых магнитов (рисунок).



**Рис.** Азотно-гелиевый криостат для сверхпроводниковых магнитов: *а* – внешний вид криостата в процессе заливки жидким гелием; *б* – конструкция криостата в продольном сечении; *в* – вид сверху: 1 – гелиевая емкость, 2 – сверхпроводниковый магнит, 3 – азотная емкость, 4 – радиационные экраны, 5 – вакуумный кожух, 6 – горловина гелиевая, 7 – коллектор, 8 – преобразователь манометрический, 9 – вентиль вакуумный, 10 – азотная горловина, 11 – верхний фланец криостата, 12 – крышка, 13 – перегородка, 14 – проушина, 15 – стеклопластиковые опоры, 16 – вертикальные теплые каналы, 17 – устройство компенсации, 18 – локальная емкость, 19 – выходное отверстие

Криостат представляет собой цельнометаллическую сварную конструкцию, состоящую из гелиевой емкости 1 со сверхпроводниковыми магнитами 2 и азотной емкости 3, которые охвачены радиационными экранами 4. Вся конструкция помещена в вакуумный кожух 5. Выходящие из гелиевой емкости четыре горловины 6 объединены коллектором 7. Криостат снабжен преобразователем манометрическим термопарным 8 (ПМТ-2 или

ПМТ-4М) и вентилем вакуумным 9, а также комплектуется съемными тоководами и гелиевыми сифонами для заливки жидкого гелия (не показаны). Азотная емкость подвешена на четырех азотных горловинах 10 к верхнему фланцу криостата 11. Выходные отверстия азотных горловин снабжены крышками 12, предназначенными для предотвращения попадания конденсата и сторонних предметов в азотную емкость во время работы и при хранении криостата. Внутри азотной емкости герметично установлены перегородки 13, которые удерживают жидкий азот от перетекания в одну сторону при наклонах криостата, что позволяет поддерживать постоянную температуру жидкого азота по дну (следовательно по азотному экрану) и устраняет возникновение динамических колебаний в криостате. Таким образом, установка перегородок в азотной емкости приводит к экономии криоагентов. Наклон криостата на требуемый угол  $\alpha$  (рисунок) осуществляется путем подъема-опускания его за две проушины 14 из четырех, расположенных на верхнем фланце.

Стеклопластиковые опоры 15 попарно установлены и противоположно направлены у основания каждой горловины азотной и гелиевой емкостей. Такая конструкция крепления емкостей в криостате позволяет ему работать в горизонтальном и наклонном положениях верхнего фланца. При этом в горизонтальном положении весовую нагрузку несут горловины, а при наклонах – стеклопластиковые опоры. Схема распределения усилий в этой конструкции выполнена так, что конечным звеном приложения усилий от веса заполненных емкостей является верхний фланец криостата независимо от его ориентации в пространстве, кожух вакуумный при этом не нагружен (он нагружен только атмосферным давлением). В днище кожуха вакуумного вдоль оси сверхпроводниковых соленоидов вварены три патрубка – вертикальные теплые каналы 16, которые, опираясь на верхний фланец криостата, исполняют роль компенсатора атмосферного давления на фланцы. В гелиевой емкости три сверхпроводниковых магнита в запитанном состоянии создают магнитные поля, приводящие к силовому воздействию между ними и элементами конструкции криостата. Для устранения силового воздействия сверхпроводниковых магнитов на элементы конструкции гелиевой емкости в ней расположено устройство компенсации 17. Оно представляет собой плиту с отверстиями, в которых закреплены сверхпроводниковые магниты так, что силовая нагрузка действует только на плиту, не нагружая элементы конструкции гелиевой емкости. Верхний сверхпроводниковый магнит, находящийся в наклоненном рабочем положении криостата, помещен в локальную емкость 18 с выходным отверстием 19 в газовую подушку гелиевой емкости. Выходное отверстие локального резервуара расположено в самой высокой части гелиевого резервуара, вследствие чего при наклоненном положении криостата уровень жидкого гелия в локальном резервуаре сохраняется самым высоким. Это предотвращает перетекание гелия и обеспечивает надежную работу сверхпроводникового магнита.

В криостате все медные радиационные экраны изготовлены с разрезами и скреплены в местах разреза изоляционным материалом, что исключает появление токов Фуко. Такое конструктивное решение позволило избежать нежелательных тепловых контактов, а следовательно, и дополнительного расхода криогенных жидкостей.

Стыковочные узлы криостата с коллектором и коллектора с газгольдером выполнены как быстросъемные вакуумные соединения. Для входных отверстий в гелиевые горловины  $\varnothing 40$  mm и выходного отверстия коллектора в газгольдер используются фланцы DN50 KF ( $\varnothing 75$  mm, 3 шт.), а для входного отверстия в гелиевую горловину  $\varnothing 26$  mm – фланец DN40 KF ( $\varnothing 55$  mm). Стыковка вентиля вакуумного с откачной системой осуществляется посредством фланца DN25 KF ( $\varnothing 40$  mm).

Работа криостата осуществляется следующим образом. Откачивают вакуумную полость криостата до остаточного давления не хуже  $1 \cdot 10^{-4}$  mm Hg. Заливают жидкий азот в азотную емкость через диагонально расположенные горловины (при этом все четыре крышки сняты). После заполнения азотной емкости через 15–20 min крышки устанавливают на прежнее место и далее осуществляют работу только с установленными крышками. Жидкий гелий заливают в гелиевую емкость через заливочную горловину. Предварительное охлаждение гелиевой емкости со сверхпроводниковыми соленоидами осуществляют жидким азотом с последующим его удалением. Удалять жидкий азот необходимо, вводя трубку  $\varnothing 10$  mm или сифон гелиевый до дна гелиевой емкости через уплотнительное устройство заливочной горловины, при этом остальные отверстия заглушены. После заливки жидкого гелия в гелиевую емкость в две ее горловины устанавливают токовводы, соединяющие источник питания со сверхпроводниковыми магнитами, и осуществляют их запитку. После запитки сверхпроводниковых магнитов токовводы извлекают и при необходимости доливают жидкий гелий в гелиевую емкость. Криостат готов к работе. Установку требуемого угла наклона криостата до  $15^\circ$  производят путем подъема двух проушин верхнего фланца криостата со стороны локальной емкости.

Созданный криостат отличается от существующих традиционных криостатов тем, что в нем установлены:

- три сверхпроводниковых магнита, расположенных в одной гелиевой емкости, которые позволяют заменить работу трех криостатов, что уменьшает габариты и массу всей установки в целом;
- устройство компенсации, позволяющее расположить три сверхпроводниковых магнита на минимальном расстоянии друг от друга, компенсируя силовую нагрузку, действующую на элементы конструкции гелиевой емкости, что позволяет повысить надежность работы криостата;
- силовые узлы, состоящие из стеклопластиковых опор, попарно установленных и противоположно направленных у основания каждой горловины азотной и гелиевой емкостей, что позволяет работать криостату в горизонтальном и наклонном положениях, не нагружая кожух вакуумный;

– локальная емкость с выходным отверстием в газовую подушку гелиевой емкости, что дает возможность надежной работы сверхпроводниковых магнитов в наклоненном положении криостата;

– перегородки в азотной емкости, удерживающие жидкий азот от перетекания в одну сторону при наклонах криостата, что позволяет уменьшить расход криогенных жидкостей;

– тонкостенные оболочки на кожухе вакуумном, подкрепленные ребрами жесткости из гнутого профиля, что уменьшает вес криостата.

Все эти конструкторские решения в комплексе дали возможность:

1) уменьшить габариты и массу криомагнитной установки в целом;

2) уменьшить затраты на приобретение материалов и изготовление криомагнитной установки в целом;

3) повысить надежность работы криостата;

4) экономить криогенные жидкости в процессе эксплуатации криостата.

На криостат разработан полный комплект конструкторской документации, по которой он изготовлен на опытном производстве Донецкого физико-технического института.

#### Технические характеристики криостата

Объем гелиевой емкости	70 л
Рабочий объем гелиевой емкости	45 л
Объем азотной емкости	70 л
Время хранения жидкого гелия в режиме «замороженного» магнитного поля	7 д
Время хранения жидкого азота	4 д
Внутренний диаметр вертикального теплого канала	172 mm
Количество вертикальных теплых каналов	3
Длина криостата	1540 mm
Ширина криостата	640 mm
Высота криостата между фланцами	750 mm
Полная высота в собранном виде	1380 mm
Вес криостата с тремя сверхпроводниковыми магнитами	800 kg

1. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, А.И. Скрыпарь, В.Ф. Ховяков, С.А. Терехов, Г.Г. Левченко, ФТВД **18**, № 2, 143 (2008).
2. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, С.А. Терехов, Г.Г. Левченко, ФТВД **20**, № 1, 133 (2010).
3. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, В.Ф. Русаков, Г.Г. Левченко, ФТВД **21**, № 4, 160 (2011).
4. В.К. Литвинов, П.Н. Постол, С.И. Папаянин, О.В. Дорошева, Приборы и техника эксперимента № 3, 247 (1987).

*P.N. Postol, E.A. Dvornikov, D.V. Varyukhin*

## CRYOSTAT FOR SUPERCONDUCTING MAGNETS

The paper describes the construction of a nitrogen-helium cryostat used for cryomagnetic separation in the course of mineral processing.

The construction of the cryostat is as follows: three superconducting magnets with warm vertical channels are placed in a helium vessel at the minimum distance, with a device that compensates interaction of their magnetic fields. Helium and nitrogen vessels have fiberglass supports near the upper flanges at the necks. The supports provide the work of the inclined cryostat: when the cryostat is horizontal, the necks are loaded; when the cryostat is inclined, the fiberglass supports work. To minimize the expenditure of liquid nitrogen and helium at the inclination of the cryostat, additional elements are mounted within the vessels: a local vessel is placed within the helium vessel and leak-proof walls are placed within the nitrogen vessel. These construction elements prevent the total leak of nitrogen and helium from the inclined cryostat, so the results are:

- reduction of the loss of liquid cryoagents in the down-dropped necks of the vessels;
- eliminated temperature gradient at the bottom of the nitrogen vessel;
- prevented movement of the center of mass of the vessels and dynamical loadings provoking increased evaporation of liquid helium.

All radiation shields have incisions. They are sewed by isolating material and secured from Foucault currents.

The technical result is: the projected cryostat with the established design decisions replaces three conventional cryostats. This fact permitted reduction of the size of the device, cost saving in the course of production, reduced expenditure of cryogenic liquids at the operation and provided reliability of the operation of superconducting magnets.

**Keywords:** cryostat, superconducting magnets, helium tank, nitrogen tank, radiation shield, vertical warm channel

**Fig.** Nitrogen-helium cryostat for superconducting magnets: *a* – external appearance of the cryostat in the course of filling by liquid helium; *b* – construction of the cryostat in the longitudinal cross-section; *c* – top view: 1 – helium tank, 2 – superconducting magnets, 3 – nitrogen tank, 4 – radiation shield, 5 – vacuum cover, 6 – helium filler, 7 – collector, 8 – pressure converter, 9 – vacuum valve, 10 – nitrogen filler, 11 – the top flange of the cryostat, 12 – cap, 13 – partition wall, 14 – screw eye, 15 – fiberglass strut, 16 – vertical warm feeds, 17 – compensation device, 18 – local capacity, 19 – outlet