

PACS: 82.80.Ej

Д.В. Варюхин, П.Н. Постол

КРЕПЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ЕМКостей В КРИОСТАТАХ

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

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 года

Описаны способы крепления криогенных емкостей в криостатах, применяемых в наших разработках, а также конструкция подвижных опор, изменяющих свое положение в соответствии с состоянием криостата в процессе его эксплуатации.

Ключевые слова: криогенная емкость, элементы крепления, опоры, подвижные опоры, сильфоны

Одним из современных направлений прикладной физики является создание и использование низких температур в лабораторных и промышленных исследованиях электрофизических и других свойств образцов. В этих целях применяют криостаты или другие криогенные установки. Для надежной и эффективной эксплуатации криостатов, работающих на сжиженных газах, необходимо емкости с жидкими криоагентами устанавливать в вакуумном кожухе, закрепляя их элементами, выполненными из теплоизоляционных материалов, что позволит уменьшить расход криогенного продукта.

В криостатах, работающих на базе криорефрижераторов [1], обычно не используются криогенные жидкости, поэтому для них не существует проблемы крепления криогенных емкостей внутри вакуумного кожуха. В заливных криостатах элементами крепления являются заливочная и дренажная горловины, воспринимающие растягивающие вертикальные нагрузки от веса различных конструктивных элементов: емкостей, криогенных жидкостей, радиационных экранов, объектов, находящихся в емкостях (сверхпроводниковые магниты), и др. При транспортировке и наклонах таких криостатов возникают дополнительные динамические и изгибающие силы, действующие на горловины. Поскольку горловины изготавливают из тонкостенных труб, обладающих пониженной прочностью, необходимо устанавливать конструктивные элементы, компенсирующие дополнительные нагрузки. С этой целью используют растяжки или опоры, которыми дополнительно закрепляют криогенные емкости внутри вакуумного кожуха. Чтобы минимизировать потери криоагента, элементы крепления необходимо изготавливать из материалов, обладающих большой прочностью и малой теплопроводностью.

В азотном криостате [2] на промежуточном радиационном экране установлены три пары радиальных опор с теплоизолированными насадками. В

каждой паре одна опора контактирует с азотной емкостью, а вторая – с кожухом криостата. Такая конструкция позволяет зафиксировать одновременно радиационный экран и криогенную емкость в вакуумном кожухе, а также отвести тепловую энергию, поступающую по опорам снаружи (вакуумного кожуха), на охлаждаемый радиационный экран, а не на криогенную емкость, что значительно увеличивает срок работы криостата с одной заливки.

В криостате для сверхпроводниковых магнитов [3] у основания каждой горловины азотной и гелиевой емкостей попарно установлены и противоположно направлены стеклопластиковые опоры, причем второй конец опор азотной емкости крепится к верхнему фланцу вакуумного кожуха, а второй конец опор гелиевой емкости – к днищу азотной емкости. Такая конструкция крепления емкостей позволяет криостату работать в горизонтальном и наклонном положениях. При этом в горизонтальном положении весовую нагрузку испытывают горловины, а при наклонах – стеклопластиковые опоры.

В этой конструкции усилия распределены таким образом, что конечным звеном приложения нагрузок от веса заполненных емкостей является только верхний фланец криостата независимо от его ориентации в пространстве, оболочка вакуумного кожуха при этом не нагружена (на нее воздействует только атмосферное давление). Тепловая энергия, поступающая по опорам снаружи (с фланца вакуумного кожуха), компенсируется испарением жидкого азота, что позволяет экономить более ценный продукт – жидкий гелий. Стеклопластик, используемый для изготовления опор, по прочностным характеристикам приравнивается к нержавеющей сталям, а его теплопроводность на порядок меньше, чем у таких сталей. Поэтому применение элементов крепления криогенных емкостей с использованием стеклопластиковых материалов наиболее приемлемо и способствует улучшению всех характеристик криостата по надежности, расходу криогенных жидкостей и длительности работы с одной заливки криоагентов.

Особый интерес представляет азотно-гелиевый криостат с конструкцией подвижных опор, изменяющих свое положение в соответствии с состоянием криостата в процессе его эксплуатации (рисунок). Криостат состоит из азотной 1 и гелиевой 2 емкостей, размещенных в вакуумном кожухе 3. В гелиевой емкости установлен сверхпроводниковый магнит 4. В нижней ее части со стороны вакуумной полости по цилиндрической окружности равномерно установлены подвижные опоры 5 в герметичных сильфонах 6, причем все внутренние полости последних соединены на ресивер 7 посредством отводов 8. Внутри сильфонов расположены механизмы установки и регулировки величины хода подвижных опор 9. Криостат имеет вертикальный теплый канал 10. Гелиевая емкость на двух тонкостенных горловинах 11 и азотная на трех горловинах 12 подвешены к верхнему фланцу 13.

При помощи механизмов, расположенных внутри сильфонов, устанавливается величина хода подвижных опор так, чтобы при их выдвигении обеспечивались надежные механический и тепловой контакты, а при отходе –

было гарантировано отсутствие этих контактов. Ресивер, а следовательно, и герметичные сильфоны заполнены газообразным гелием массой m и изолированы от гелиевой емкости.

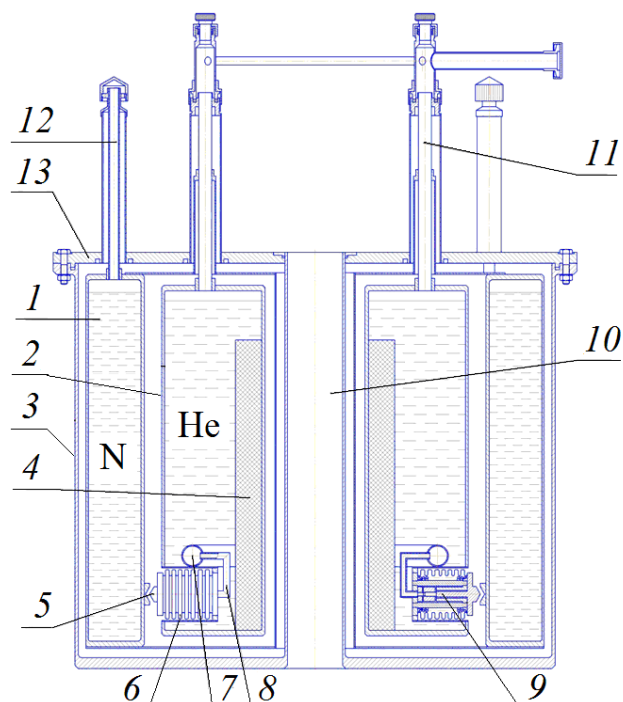


Рис. Азотно-гелиевый криостат с подвижными опорами: 1, 2 – соответственно азотная и гелиевая емкости, 3 – вакуумный кожух, 4 – сверхпроводниковый магнит, 5 – подвижная опора, 6 – герметичный сильфон, 7 – ресивер, 8 – отвод, 9 – механизмы установки и регулировки величины хода подвижных опор, 10 – вертикальный теплый канал, 11, 12 – горловины соответственно гелиевой и азотной емкостей, 13 – верхний фланец

Работу подвижных опор можно объяснить, используя уравнение идеального газа [4]:

$$PV = m/MRT, \quad (1)$$

где P – давление; V – объем; m – масса; M – молярная масса; R – молярная газовая постоянная, $R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; T – абсолютная температура.

Из уравнения (1) следует, что при условии $m = \text{const}$ и $PV/T = \text{const}$ выполняется равенство

$$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2, \quad (2)$$

где P_1, P_2 ; V_1, V_2 ; T_1, T_2 – соответственно давление, объем, температура газа в ресивере и герметичных сильфонах в условиях комнатных температур (с индексом 1) и при изменившихся условиях (с индексом 2). Установив ход подвижных опор в размере 5 мм, можем пренебречь изменением внутреннего объема герметичных сильфонов при их движении.

В исходном состоянии $P_1 = 4$ at, $T_1 = 291$ К, подвижные опоры максимально выдвинуты и упираются в азотную емкость. Гелиевая емкость со сверхпроводящим соленоидом надежно закреплена в криостате, и его можно транспортировать.

При установке криостата на рабочий стенд его охлаждают, заливая азотную емкость жидким азотом. При этом подвижные опоры выдвинуты. Упираясь в азотную емкость, они осуществляют функцию теплоотводов, охлаждая гелиевую емкость и сверхпроводниковый магнит до температуры жидкого азота. Давление в герметичных сильфонах и ресивере уменьшается, но остается еще избыточным и при температуре жидкого азота ($T_2^N = 77.3$ К) составляет

$$P_2^N = P_1 T_2^N / T_1 = 1.06 \text{ at} . \quad (3)$$

На этом завершается предварительное охлаждение гелиевой емкости и сверхпроводникового магнита, которое осуществляется жидким азотом, находящимся в азотной емкости.

Далее в гелиевую емкость заливают жидкий гелий, температура которого составляет $T_2^{\text{He}} = 4.2$ К. В ресивере и герметичных сильфонах, находящихся в гелиевой емкости, температура резко падает. При этом также резко понижается давление, согласно (3) оно составляет

$$P_2^{\text{He}} = P_1 T_2^{\text{He}} / T_1 = 0.06 \text{ at} . \quad (4)$$

Как следствие, сильфоны сжимаются, а подвижные опоры отходят на 5 mm от азотной емкости, устраняя механический и тепловой контакты между азотной и гелиевой емкостями. Теплоприток к гелиевой емкости в данном случае минимален, поскольку устранен подвод тепловой энергии по элементам крепления, а тонкостенные горловины охлаждаются выходящими парами гелия. В результате криостат приведен в рабочее положение и готов к эксплуатации.

Для поддержания рабочего состояния криостата необходимо регулярно доливать жидкие криоагенты. По окончании экспериментальных работ криогенные жидкости удаляются, при этом температура и давление в ресивере и полостях герметичных сильфонов увеличиваются, подвижные опоры выдвигаются и упираются в азотную емкость, закрепляя гелиевую емкость со сверхпроводниковым магнитом внутри криостата. Устанавливаются механический и тепловой контакты между азотной и гелиевой емкостями. Теплоприток к гелиевой емкости со сверхпроводниковым магнитом при этом возрастает, и она ускоренно отепляется. Криостат приведен в транспортное положение.

Использование описанной конструкции подвижных опор позволяет автоматически, без применения специальных датчиков и систем управления:

- переводить криостат из рабочего состояния в транспортное при окончании экспериментальных работ;
- закреплять гелиевую емкость со сверхпроводниковым магнитом внутри криостата;

- отеплять криостат по тепловым мостам подвижных опор до температуры окружающей среды;
- осуществлять предварительное охлаждение до температуры жидкого азота гелиевой емкости со сверхпроводниковым магнитом по тепловым мостам подвижных опор от азотной емкости (т.е. исключается заливка в гелиевую емкость жидкого азота);
- экономить жидкий гелий, так как он не расходуется на предварительное охлаждение гелиевой емкости со сверхпроводниковым магнитом;
- переводить криостат в рабочее состояние при заливке жидкого гелия в гелиевую емкость;
- удерживать тепловые мосты разомкнутыми в процессе работы криостата.

Технические характеристики подвижных опор криостата

Исходное рабочее давление при комнатной температуре, ат	4
Максимально допустимое рабочее давление, ат	11
Применяемый рабочий газ	гелий
Установленный рабочий ход сильфонов, мм	5
Максимально допустимый рабочий ход сильфонов, мм	12.8
Наружный диаметр сильфонов, мм	45
Применены стандартные сильфоны	45-17-022-1 ГОСТ 22388-77

1. *Д.В. Варюхин, Е.А. Дворников, П.Н. Постол, Д.О. Федюк*, ФТВД **27**, № 2, 130 (2017).
2. *П.Н. Постол, Л.В. Бережная, А.И. Скрытарь, В.Ф. Ховяков, С.А. Терехов, Г.Г. Левченко*, ФТВД **18**, № 2, 143 (2008).
3. *П.Н. Постол, Е.А. Дворников, Д.В. Варюхин*, ФТВД **23**, № 4, 128 (2013).
4. *О.Ф. Кабардин*, Физика. Справочные материалы, Просвещение, Москва (1991).

D.V. Varyukhin, P.N. Postol

SUPPORT SETTINGS FOR CRYOGENIC CONTAINERS IN CRYOSTATS

The methods of mounting of cryogenic containers in the designed cryostats are described as well as the design of the movable supports that move with respect to the cryostat state in the course of operation.

Keywords: cryogenic container, support elements, supports, movable supports, bellows

Fig. Nitrogen-helium cryostat with movable supports: *1, 2* – nitrogen and helium containers, respectively, *3* – vacuum jacket, *4* – superconducting magnet, *5* – movable support, *6* – hermetic bellows, *7* – receiver, *8* – sink, *9* – mechanisms for the control of the stroke of the movable supports, *10* – vertical heat channel, *11, 12* – necks of the nitrogen and helium containers, respectively, *13* – upper flange