

PACS: 82.80.Ej

П.Н. Постол, Д.В. Варюхин, Е.В. Дворников, Д.О. Федюк

## КРИОСТАТ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ МЕССБАУЭРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА БАЗЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТРУБЫ

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

Статья поступила в редакцию 24 марта 2017 года

*С учетом характеристик криоохладителя SRP-062B и компрессора F-50H разработан криостат замкнутого цикла для мессбауэровских измерений. Приняты технические и конструкторские решения для согласованной работы по теплообменным процессам пульсационной трубы в составе криостата. Выполнены расчеты тепловых и прочностных характеристик криостата. Выбран материал и предложена конструкция гибкого теплопровода, не передающего вибрацию от источника к потребителю. Решен вопрос безвибрационной теплопередачи от двух рабочих ступеней криоохладителя к радиационному экрану и исследуемому образцу. Рабочий диапазон температур криостата 4.2–325 К, время установления заданного интервала не более 150 мин.*

**Ключевые слова:** криоохладитель, компрессор, вибрация

В настоящее время для создания сверхнизких температур применяют, как правило, криостаты двух типов: 1) использующие хладосодержание жидких криоагентов (азота, гелия) и 2) механические криоохладители без применения последних.

Проведение экспериментальных исследований с помощью криостатов первого типа выгодно при наличии вблизи ожижительных установок и газгольдерной системы для сбора испарившегося жидкого гелия и других ценных или опасных криоагентов. Криостаты, работающие на жидких криоагентах, предпочтительно применять в установках, где недопустимы вибрации. Криостаты такого типа были разработаны и изготовлены нами для мессбауэровских измерений и сверхпроводниковых магнитов. Описание, характеристики и конструкции этих криостатов изложены в работах [1–6].

В условиях с ограниченными возможностями получения жидких криоагентов удобно использовать криостаты с замкнутым циклом, в которых для охлаждения исследуемых образцов применяют механические криоохладители. В этих криостатах обычно устанавливают криоохладители, использующие замкнутый цикл Гиффорда–МакМагона, так как они обладают повышенным ресурсом работы [7].

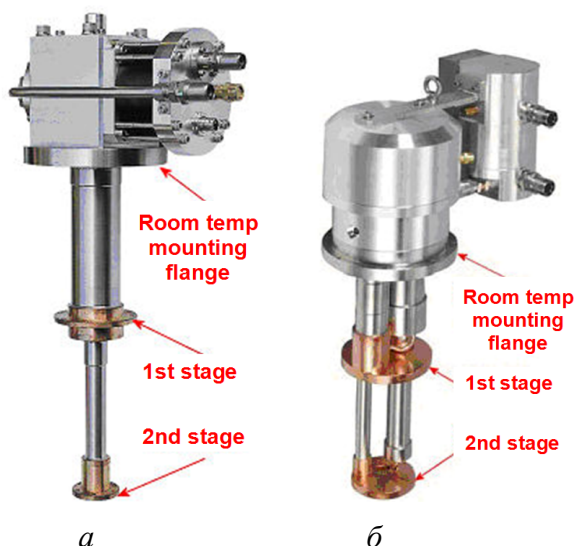
Криостатирование осуществляется следующим образом. Рабочая камера с исследуемым образцом крепится теплопроводным контактом к рабочей ступени криоохладителя с заданной температурой (4.2 К). Камера охвачена радиационным экраном, механически связанным со второй ступенью криоохладителя (78–50 К). В результате происходит охлаждение рабочей камеры с образцом до заданной температуры, после чего проводят экспериментальные исследования любой длительности в заданном режиме. Такие криостаты могут устанавливаться в учебных и научно-исследовательских учреждениях, промышленных предприятиях (где необходимы криогенные температуры), они требуют небольших эксплуатационных расходов.

Недостатком механического криоохладителя являются вибрации, возникающие при охлаждении его рабочих ступеней. Вибрации через элементы крепления передаются на исследуемый образец, что может негативно влиять на проведение исследований. Поэтому необходимо изолировать образец от вибраций, создаваемых механическими криоохладителями. Конструкция криостата, в котором исследуемый образец и механический криоохладитель, основанный на цикле Гиффорда–МакМагона, установлены на отдельных собственных рамах, изолированных от вибраций, разработана нами и описана в работе [8]. В настоящее время имеется целый ряд компаний-производителей компактных криоохладителей, основанных на использовании цикла Гиффорда–МакМагона или принципа пульсационной трубы.

Криоохладители, работающие по принципу пульсационной трубы, не имеют движущихся частей на холодном конце, что позволяет снизить вибрации до минимальных значений. Они представляют собой более простую конструкцию и соответственно обладают большей надежностью, чем аналогичные криоохладители на базе цикла Гиффорда–МакМагона. По данным [9], для последних криоохладителей (рис. 1,а) вибрации на второй рабочей ступени (4.2 К) вдоль оси холодной головки составляют  $\sim 20 \mu\text{m}$ , а перпендикулярно оси –  $5 \mu\text{m}$ ; для криоохладителей, работающих по принципу пульсационной трубы (рис. 1,б), эти показатели составляют соответственно  $\sim 4 \mu\text{m}$  и  $\sim 2 \mu\text{m}$ .

Вышесказанное делает SRP-серию криоохладителей более удачным выбором для проведения исследовательских работ, особенно чувствительных к вибрациям. На основе приведенных данных и предварительных расчетов нами определена возможная тепловая нагрузка на рабочие ступени криоохладителя в создаваемом криостате. Расчеты показали, что при наличии многослойной вакуумной теплоизоляции тепловая энергия, поступающая на первую ступень, составляет 7 W, а на вторую – до 0.1 W. В рабочем режиме при изменениях температуры образца тепловая нагрузка на криоохладитель может возрасти. Учитывая это, а также с целью уменьшения времени выхода на рабочий режим 4.2 К необходимо использовать криоохладитель с увеличенным запасом по холодопроизводительности. Для нашего варианта, с учетом минимальных вибраций, выбран криоохладитель SRP-062B произ-

водства Sumitomo Heavy Industries (Япония), работающий по принципу пульсационной трубы с двумя температурными ступенями (рис. 1,б).



**Рис. 1.** Механические криоохладители: *а* – SRDR-205D, работающий на основе цикла Гиффорда–МакМагона; *б* – SRP-062B, работающий по принципу пульсационной трубы

**Технические характеристики криоохладителя SRP-062B**

Холодопроизводительность, W:	
1-я ступень при температуре 65 K	30
2-я ступень при температуре 4.2 K	0.5
Минимальная температура, K	3.0
Время захлаживания до 4.2 K, min	не более 100
Вес, kg	23.2
Габариты, mm	604×336×190

Криоохладитель работает с гелиевым газовым компрессором F-50H производства Sumitomo Heavy Industries (Япония) (рис. 2).

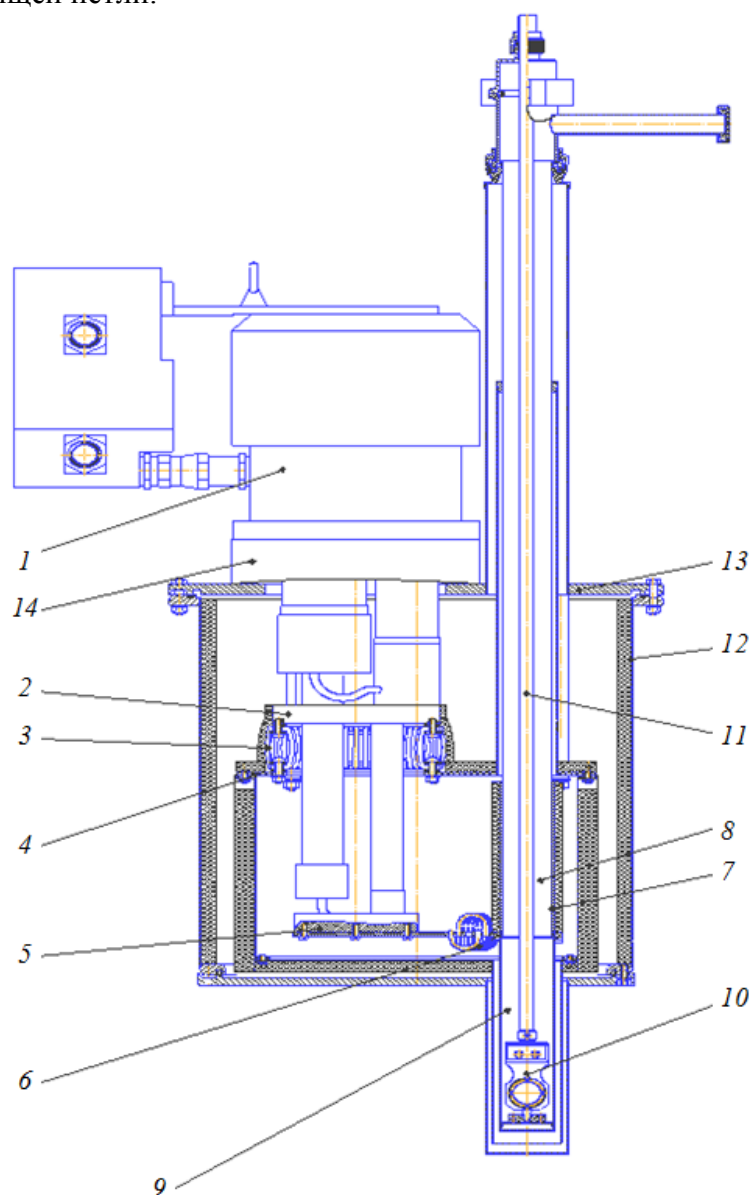
**Технические характеристики компрессора F-50H**

Потребляемая мощность, kW	6.5
Питание, V	380, 400, 415
Расход охлаждающей воды, l/min	7
Вес, kg	120
Габариты, mm	591×450×588
Периодичность технического обслуживания, h	30000
Температура охлаждающей воды, °C	до 28



**Рис. 2.** Внешний вид компрессора F-50

На основании выбранного криоохладителя с компрессором разработан криостат замкнутого цикла для мессбауэровских измерений на базе пульсационной трубы (рис. 3), отличительной особенностью которого является устранение передачи вибрации криоохладителя от рабочих ступеней (4.2 и 65 К) к объекту охлаждения по теплопроводным контактам. Это стало возможным благодаря использованию гибких теплопроводных контактов, выполненных из многожильных проводов высокой теплопроводности в виде виброгасящей петли.



**Рис. 3.** Криостат замкнутого цикла, работающий по принципу пульсационной трубы: 1 – криоохладитель, 2 – первая ступень, 3 – гибкий теплопроводный контакт, 4 – медный радиационный экран, 5 – вторая ступень, 6 – гибкий теплопроводный контакт, 7 – холодильник, 8 – шахта образца, 9 – рабочая камера, 10 – держатель образца, 11 – штанга, 12 – вакуумный кожух, 13 – верхний фланец, 14 – вибропоглощающая опора

В криостате криоохладитель *1* представляет собой двухступенчатую пульсационную трубу SRP-062. Первая ступень *2* соединена гибким теплопроводным контактом *3* в виде петли с медным радиационным экраном *4*, который поддерживает температуру 65 К при тепловой нагрузке до 30 W. Радиационный экран подвешен к верхнему фланцу вакуумного кожуха теплоизоляционным контактом. Гибкость теплопроводного контакта обеспечивается набором многожильных медных проводов, причем чем тоньше жилы проводов, тем больше гибкость. В нашей конструкции диаметр одной жилы составляет 0.38 mm, что позволяет устранить жесткую связь криоохладителя с медным радиационным экраном. Общее сечение теплопроводного контакта определено для каждой ступени криоохладителя согласно отводимой тепловой мощности и поддерживаемой температуре.

Вторая ступень *5* гибким теплопроводным контактом *6* в виде петли соединена с холодильником *7*, который поддерживает температуру 4.2 К при тепловой нагрузке до 0.5 W. Теплопроводный контакт второй ступени конструктивно выполнен аналогично контакту первой. Холодильник представляет собой медный патрубок большой теплопроводности, плотно охватывающий шахту образца *8* в районе рабочей камеры *9*, и позволяет поддерживать в ней температуру 4.2 К при наличии теплообменного газа ( $\text{He}^4$ ). Механический контакт между исследуемым образцом и холодильником отсутствует, рабочая температура поддерживается только за счет теплообменного газа. В рабочей камере установлен держатель образца *10* с нагревателем и датчиком температуры. Держатель крепится на штанге *11*, которая герметично вводится в шахту образца и фиксирует его в рабочей камере. Конструкция криостата позволяет менять образец, не выключая криоохладитель. Холодильник, гибкий теплопроводный контакт и вторая ступень криоохладителя охвачены медным радиационным экраном и помещены в вакуумный кожух *12*. Криоохладитель установлен на верхнем фланце *13* кожуха и закреплен на нем с вибропоглощающей опорой *14*.

Криостат с гибкими теплопроводными контактами в виде петли, выполненными из многожильных медных проводов, позволяет устранить жесткую связь ступеней криоохладителя с объектом охлаждения, а значит, и передачу вибрации от источника охлаждения к исследуемому образцу.

Криостат комплектуется термоконтроллером, вакуумным насосом и теплообменным газом (газообразным гелием).

Работа криостата заключается в следующем. После установки держателя образца в рабочую камеру производят ее откачку. Затем с помощью термоконтроллера задают требуемую температуру криоохладителя, при достижении которой в рабочую камеру подают газообразный гелий. В результате посредством гибкого теплопроводного контакта происходит охлаждение до заданной температуры холодильника и рабочей камеры с образцом за счет теплообмена последней с охлажденной второй ступенью криоохладителя. Для работы при высоких (325 К) температурах включают нагреватель дер-

жателя образца, не включая криоохладитель. Регулировка и контроль температуры осуществляются термоконтроллером. При использовании термоконтроллера типа 332S производства ЛейкШор (США) обеспечивается точность криостатирования образцов  $\pm 0.5$  К.

### *Технические характеристики разработанного криостата*

Температурный интервал работы, К	4.2–325
Время выхода на температурный режим в диапазоне 4.2–325 К, min	не более 150
Внутренний диаметр рабочей камеры, mm	34.4
Диаметр окон, mm:	
теплых	18
холодных	16
Размеры криостата, mm:	
высота	1028
ширина	516
диаметр	357

### **Выводы**

1. При проектировании криостата замкнутого цикла для мессбауэровских измерений приняты технические и конструкторские решения для согласованной работы по теплообменным процессам пульсационной трубы в составе криостата. Выполнены тепловые и прочностные расчеты криостата. Разработана конструкторская документация.

2. Решен вопрос безвибрационной теплопередачи от двух рабочих ступеней криоохладителя к радиационному экрану и исследуемому образцу. Для этого выбран материал и предложена конструкция гибкого теплопровода, не передающего вибрацию от источника к потребителю.

3. Разработанный криостат позволяет расширить область применения механических криоохладителей.

1. Патент України на корисну модель № 89429, Криостат для надпровідних магнітів, Д.В. Варюхін, Є.О. Дворніков, П.М. Постол, Опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
2. П.Н. Постол, Е.А. Дворников, Д.В. Варюхин, ФТВД **23**, № 4, 128 (2013).
3. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, А.И. Скрыпаль, В.Ф. Ховяков, С.А. Терехов, Г.Г. Левченко, ФТВД **18**, № 2, 143 (2008).
4. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, С.А. Терехов, Г.Г. Левченко, ФТВД **20**, № 1, 133 (2010).
5. Патент України на корисну модель № 64099, Криостат, Г.Г. Левченко, П.М. Постол, Л.В. Бережна, Опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
6. В.К. Литвинов, П.Н. Постол, С.И. Папаянин, О.В. Дорошева, Приборы и техника эксперимента № 3, 247 (1987).

7. А.М. Кабанов, В.Н. Мурунец-Маркевич, Техника низких температур. Сборник научных трудов, Наукова думка, Киев (1979), с. 99.
8. П.Н. Постол, Л.В. Бережная, В.Ф. Русаков, Г.Г. Левченко, ФТВД **21**, № 4, 160 (2011).
9. Прайс-лист: Pulse Tube Cryocoolers vs. Gifford-McMahon Cryocoolers. <http://www.janis.com/Products/Cryocoolers/PulseTubeVsGiffordMcMahonCryocoolers.aspx>

*P.N. Postol, D.V. Varyukhin, E.V. Dvornikov, D.O. Fedyuk*

### CLOSED-CYCLE CRYOSTAT TARGETED TO MÖSSBAUER TESTING AND BASED ON A PULSE TUBE

With account of the characteristics of cryocooler SRP-062B and compressor F-50H, a closed-cycle cryostat targeted to Mössbauer testing has been designed. Technical and designing decisions have been made to provide concordant work on heat exchange processes of the pulse tube that is a component of the cryostat. The heat and strength characteristics of the cryostat are calculated. The material is selected and a flexible heat line is designed that do not transfer vibration from the source to the consumer. The problem of vibration-free heat transmission from two work stages of the cryocooler to the radiation screen and the tested sample is solved. The operating range of the cryostat temperature is 4.2–325 K, the time of stabilization of the specified interval does not exceed 150 min.

**Keywords:** cryocooler, compressor, vibration

**Fig. 1.** Mechanical cryocoolers: *a* – SRDR-205D, based on the Gifford–McMagon cycle; *b* – SRP-062B, working on the principle of the pulse tube

**Fig. 2.** The exterior of compressor F-50

**Fig. 3.** Closed-cycle cryostat of on the basis of the pulse tube: *1* – cryocooler, *2* – first stage, *3* – flexible heat-conducting contact, *4* – copper radiation screen, *5* – second stage, *6* – flexible heat-conducting contact, *7* – refrigerator, *8* – shaft pattern, *9* – working chamber, *10* – sample holder, *11* – rod, *12* – casing vacuum, *13* – upper flange, *14* – vibration-absorbing support