

Гелиевый криостат для исследований в космическом пространстве

М.П. Ларин

«Инновационно-производственная лаборатория вакуумных и криогенных систем»

СПбГПУ, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 maxen@mail.ru, www.vacris.ru

Разработан криостат для проведения в космическом пространстве исследований в жидком гелии в сверхтекучем состоянии. Криостат выполнен из титана и алюминия. Ёмкость He-сосуда - 100 л. Расчётный вес криостата не более 50 кг. Ресурс его до полного испарения гелия от собственных теплопритоков - не менее 5 месяцев. В криостате предусмотрены узлы, обеспечивающие его работоспособность после перегрузок до 8g при взлёте ракеты-носителя. Криостат планируется доставить на Международную космическую станцию (МКС) в 2011-2012 г.

В Санкт-Петербургском государственном политехническом университете в «Инновационно-производственной лаборатории вакуумных и криогенных систем» по техническому заданию Центрального научно-исследовательского института машиностроения (г. Москва) разработан технический проект криостата для исследований в космическом пространстве в условиях невесомости, в котором в качестве криогента используется жидкий гелий в сверхтекучем состоянии (ниже λ -точки). Криостат предназначен для проведения работ на МКС.

Основные параметры криостата:

1. вес заполненного гелием криостата – не более 100 кг;
2. объем сосуда для жидкого гелия - не менее 100 л;
3. ресурс непрерывной работы на орбите – не менее 1 месяца;
4. криостат должен оставаться работоспособным после перегрузок при взлёте ракеты-носителя;
5. криостат должен иметь окна для проведения в автоматическом режиме наблюдения с помощью видеокамеры за процессами в объекте, размещённом в сверхтекучем гелии.

С учётом указанных выше параметров был разработан криостат, общий вид которого представлен на рис. 1.

Для максимально возможного снижения веса криостата при сохранении его прочностных характеристик такие традиционные материалы, которые обычно используются для создания криостатов, как нержавеющая сталь и медь, были заменены на титан и алюминий.

Криостат содержит корпус 1, гелиевый сосуд 2, выполненные из листового титана ВТ-1-0, крышки и днища имеют толщину 2 мм, а цилиндрические обечайки – 1,5 мм. В зазоре между корпусом 1 и сосудом 2 размещены три экрана. Экраны 3, 4, так называемые «плавающие», сделаны из листа нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Экран 5 выполнен из листового чистого алюминия толщиной 3 мм. Внутри сосуда 2 расположена корзина 6 с адсорбентом 7, перекрытым экраном 8 из пористой меди. Внутренняя полость корзины 6 соединена тремя патрубками 9 с вакуумным зазором 10 криостата.

Все поверхности узлов 1–5, обращённые в вакуумный зазор 9, полированы и имеют покрытия с малой степе-

ню черноты [1-7].

В верхней части криостат имеет трубку-подвес 11 для заливки жидкого гелия и выхода его паров. Эта трубка выполнена из нержавеющей гибкого гофрированного шланга со спиралевидным профилем гофр, и имеет диаметр канала 14 мм и толщину стенки 0,5 мм. Криостат содержит трубку 12 для заполнения сосуда 2 жидким гелием и трубку 13 для выхода гелиевых паров при его заливке и при дальнейшем испарении.

Трубка 11 стыкуется сверху с патрубком 14 из титана с помощью фланца 15 из нержавеющей стали и фланца 16 из титана, а снизу - с помощью фланца 17, аналогич-

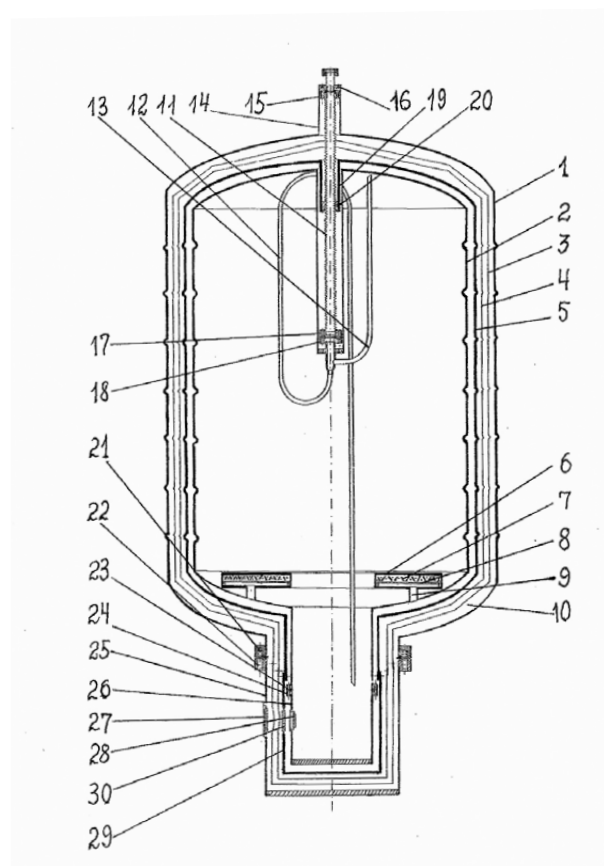


Рис. 1. Общий вид гелиевого криостата

ного фланцу 15, и фланца 18, аналогичного фланцу 16. Благодаря специальной конструкции указанных фланцев, уплотнения их остаются герметичными при многократных охлаждениях до 4,2К и отогревах до 200°С.

Между алюминиевым патрубком 19 экрана 5 и трубкой 11 имеется шайба 20, сваренная с патрубком 19 и имеющая резьбу, такого же профиля, как у гофр трубки 11.

В нижней части корпус криостата имеет герметичное разъёмное соединение с металлическим уплотнением, состоящее из фланцев 21 и 22 и аналогичное соединение на гелиевом сосуде, состоящее из фланцев 23 и 24, причём фланцы 21 и 23 выполнены из титана, а фланцы 22 и 24 – из нержавеющей стали. Патрубок 25 корпуса и патрубок 26 гелиевого сосуда сделаны из нержавеющей стали, и имеют окна 27 и 28, герметично приваренные с помощью коварового перехода со своими патрубками. Между ними имеется алюминиевый патрубок 29, который имеет окно 30, которое с хорошим тепловым контактом закреплено с патрубком 29.

На днище корпуса имеется патрубок с фланцем, к которому стыкуется клапан Ду16 «Конфлат» с металлическим уплотнением седла (на чертеже не показан). Этот клапан служит для предварительной откачки объёма 10 до давления ~ 40 Па и ниже не реже 1 раза в год.

Обычно при запуске криостата в сосуд 2 сначала заливают небольшое количество жидкого азота для предварительного охлаждения его примерно до 80 – 100К. После того, как корзина 7 охладится, давление в пространстве 10 снизится ~ до 10^{-4} - 10^{-5} Па за счёт откачки остаточных газов адсорбентом 7 при азотной температуре. Далее, после откачки полости сосуда 2 и удаления остатков паров азота, в этот сосуд заливают жидкий гелий. Через несколько часов давление остаточных газов в полости 10 снизится ~ до 10^{-8} – 10^{-9} Па за счёт откачки остаточных газов адсорбентом 7 уже при температуре жидкого гелия. При таком давлении практически полностью исключается теплообмен остаточными газами между поверхностями корпус 1, экранов 3–5 и наружной поверхностью сосуда 2.

Теперь возможна теплопередача сосуду 2 с жидким гелием только за счёт теплопритоков излучением и теплопроводность по трубке 11.

Как было указано выше, все теплообменные излучением поверхности криостата имеют покрытия с низкой степенью черноты [1-7] Так при $T = 295\text{K}$, 80К и 4,2К покрытия в виде плёнок алюминия, нанесённые в протоке паров жидкого гелия имеют соответственно степень черноты $\varepsilon_{295} = 0,02$ - 0,015, $\varepsilon_{80} = 0,015$ – 0,01 и $\varepsilon_{4,2} = 0,002$.

При разработке технического проекта были сделаны тепловые расчёты криостата, которые показали следующее: теплоприток излучением с поверхности экрана 5 на наружную поверхность гелиевого сосуда 2 будет 0,23 Вт, если не учитывать снижение температуры экрана 5 за счёт охлаждения его парами гелия, отходящими по трубке 11 и охлаждающими втулку 20, а через неё и экран 5. Если за счёт энтальпии отходящих паров гелия температура экрана 5 снизится, например, до 80К, то теплоприток излучением, который поглотит

поверхность гелиевого сосуда 2, будет, как показывают расчёты, $Q_{\text{изл}} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ Вт.

Теплоприток по трубке 11 к её нижней части от верхней, находящейся при температуре, близкой к комнатной, без учёта теплосъёма парами гелия будет 0,03 Вт. Но эта величина будет также меньше, если учесть этот теплосъём. Обычно КПД эффективности теплосъёма парами по нашим экспериментальным данным на аналогичных гелиевых криостатах оценивается в 70 – 90% в зависимости от скорости потока, диаметра и длины трубки-подвеса. Если взять минимальный КПД 70%, то тогда теплоприток непосредственно к жидкому гелию снизится с 0,03 до $9 \cdot 10^{-3}$ Вт, а суммарный станет $Q_{\Sigma} = 5,2 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-3} = 1,42 \cdot 10^{-2}$ Вт. При таком теплопритоке испаряемость гелия будет ~ $1,84 \cdot 10^{-2}$ л/час, и тогда гелий в количестве 100 л испарится полностью за 7,5 месяцев. С другой стороны, как показывают расчёты, энтальпия паров гелия вместе с теплотой испарения будет $E = 20,9 + 390 = 410,9$ Дж/г. Если взять ту же эффективность теплосъёма парами 70%, тогда $E_{70\%} = 287$ Дж/г.

При полном испарении 100 литров гелия (12500 г) с учётом 70% теплосъёма полная энтальпия будет $E_{\text{полн.}} = 287 \text{ Дж/г} \cdot 12500 \text{ г} = 3,59 \cdot 10^6$ Дж. Тогда при суммарном теплопритоке к втулке 20, равном $0,23 + 0,03 = 0,26$ Вт за счёт энтальпии паров $E_{\text{полн.}} = 3,59 \cdot 10^6$ Дж время испарения 100 л гелия будет $3,59 \cdot 10^6 \text{ Дж} : 0,26 \text{ Дж/сек} = 1,38 \cdot 10^7 \text{ сек} = 5,3$ месяца.

Как видно из приведённых цифр, полученных двумя путями, время полного испарения гелия получается близким друг другу, и оно будет примерно несколько больше 5-ти месяцев.

Проведённый расчёт веса криостата показал, что при использовании титана и алюминия в качестве конструкционных материалов вес его будет не более 50 кг.

Криостат имеет узлы, обеспечивающие его надёжность и сохранение работоспособности при перегрузках до 8g при взлёте ракеты-носителя (на чертеже не показаны).

Предполагается, что за несколько дней до старта космического корабля с криостатом на борту криостат будет заправляться жидким гелием, после чего будет проводиться откачка его паров до температуры несколько выше λ -точки (~2,2К). После этого клапан на верхней горловине заливного патрубка будет закрыт, и он будет открыт по команде с МКС уже на орбите. Дальнейшее снижение температуры гелия ниже λ -точки будет происходить за счёт космического вакуума.

Литература:

1. М.П. Ларин, В.В. Гаевский. Способы снижения удельной испаряемости хладагентов заливных гелиевых сверхвысоковакуумных насосов. Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика и техника высокого вакуума, вып.2 (8), 1977 г.
2. М.П. Ларин. К вопросу о напылении плёнок в парах жидкого гелия. Электронная техника, сер. Материалы, вып. 5, 1980 г.
3. М.П. Ларин. Получение, измерение и использование

- поверхностей с малой степенью черноты при низких температурах. Журнал технической физики, т. 53, № 5, 1983 г.
4. M.P. Larin. Preparation of thin film coating allowing ~ 10⁴ reduction in gas emission on the surfaces of ultra-high vacuum system. Vuoto, vol. xx, № 2, Triest, Italy, 1990.
 5. M.P. Larin, V.I. Rahovsky. Special Coating for UHV Component and Chambers. Тезисы доклада на конференции AVS, 1993, Orlando, USA.
 6. М.П. Ларин, В.И. Раховский. Способ нанесения металлического покрытия. Российский патент на изобретение № 2067130, 1995 г.
 7. M.P. Larin, I. Drapkin, T.M. Larina. Deposition of Thin Film Metallic Coating on Walls of Ultra-High Vacuum Systems to Reduce Outgassing. Тезисы доклада на конференции AVS, 1995, Minneapolis, USA.