

БЕЗАЗОТНЫЙ ГЕЛИЕВЫЙ КРИОСТАТ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО РЕЗОНАТОРА

Н.Н. Пренцлау, Ф.Ф. Менде, В.Н. Логвинов, И.Н. Бондаренко,
А.В. Трубицын

Для размещения сверхпроводящих резонаторов используют гелиевые криостаты специальной конструкции [1], к которым предъявляются следующие требования:

Резонатор должен надежно охлаждаться до гелиевой температуры, при этом желательно, чтобы была обеспечена возможность его смены без разгерметизации вакуумной полости криостата.

Длина линий связи резонатора с внешними СВЧ цепями должна быть минимальной, а уровень жидкого гелия не должен влиять на перераспределение температур вдоль этих линий.

В настоящее время известны гелиевые безазотные криостаты, в которых испаряющийся гелий используют для охлаждения горловины и экранов [2]. Они конструктивно проще, меньше по объему и весу, удобнее в эксплуатации. При этом скорость выкипания гелия в них соизмерима со скоростью выкипания в криостатах с азотным охлаждением или даже ниже. Однако длинная и малая в диаметре горловина, а также длительное время выхода на режим затрудняет их использование для размещения сверхпроводящих резонаторов. На рис. I приведена конструкция безазотного гелиевого криостата, которая, с одной стороны, имеет преимущества, присущие обычным безазотным гелиевым криостатам, а, с другой стороны, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к криостатам для размещения сверхпроводящих резонаторов. Горловина I, на которой подвешена гелиевая емкость 2, имеет разрыв в точках а-б. К горловине в этих точках подсоединены экраны 3 и 4, которые соединены между собой тонкостенной трубкой 5. Между ними, подсоединенный к точке а, расположен экран 6, выполненный из материала с низкой теплопроводностью (например из пенопласта). К экрану 3 подсоединен змеевик 7, который имеет хороший теплоконтакт с горловиной I в точках 8 и 9. Вакуумная полость криостата заполнена экранно-вакуумной изоляцией. В гелиевой емкости 2 установлен стакан II, в котором размещен сверхпроводящий резонатор I2, подвешенный к фланцу I4 линиями связи I3. К этим линиям присоединены диски I5 и I6, выполненные из меди, причем диск I5 имеет теплоконтакт со стаканом II, а диски I6 - с горловиной I в точках 8 и 9. Для ужесточения конструкции применены растяжки I7, (шелковые нити), ограждающие колпаки которых I8 используют как стойки. Для ускорения заливки криостата жидким гелием предусмотрен клапан I9, позволяющий производить выпуск паров либо по змеевику 7, либо через горловину I. Отходящие пары гелия последовательно охлаждают стакан II, участок горловины Бб, экран 4, трубку 5 и экран 3 (путь движения паров гелия между экранами показан на рис. I

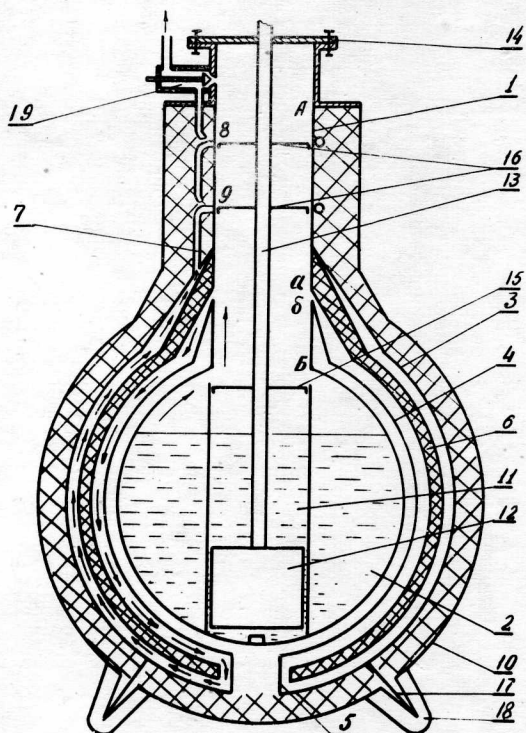


Рис. I.

ки которых I8 используют как стойки. Для ускорения заливки криостата жидким гелием предусмотрен клапан I9, позволяющий производить выпуск паров либо по змеевику 7, либо через горловину I. Отходящие пары гелия последовательно охлаждают стакан II, участок горловины Бб, экран 4, трубку 5 и экран 3 (путь движения паров гелия между экранами показан на рис. I

стрелками). Далее пары поднимаются по змеевику 7, охлаждают участок Аа горловины I в точках 8 и 9, тем самым уменьшая мощность, передаваемую к жидкому гелию, как по материалу горловины, так и по теплоизоляции.

Охлаждение экранов в такой конструкции происходит практически при заливке криостата жидким гелием, что приводит к сокращению времени выхода его на режим до 2-2,5 часов.

Стакан II выполнен из материала с высокой теплопроводностью (из меди). Температура стакана II, а также линий связи в точке их крепления к диску I5 поддерживается практически постоянной благодаря высокой теплопроводности материала диска I5 и стакана II, а также охлаждению их парами. Это приводит, с одной стороны, к тому, что уровень жидкого гелия не влияет на перераспределение температур вдоль линий связи и, с другой стороны, к постоянству температуры резонатора I2 даже в том случае, когда уровень жидкого гелия в криостате ниже высоты резонатора. При заливке криостата гелием клапан I9 открывается. В этом случае пары гелия проходят как по горловине I, так и по змеевику 7. После заливки криостата клапан I9 закрывают, и пар выходит только через змеевик 7, охлаждая экраны и горловину.

Из условий теплового баланса можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_{U3} + Q_{\Lambda a} &= Q_{\text{экp 3}} \\ Q_{\text{экp 3}} - m \Delta i_5 &= Q_9 + Q_5 = Q_{\text{экp 4}} \\ Q_{\text{экp 4}} - m \Delta i_{\text{Бб}} &= Q_{U3\Gamma} + Q_{\text{Бб}} \\ Q_{U3\Gamma} + Q_{\text{Бб}} &= m \gamma \\ m &= \frac{M}{t} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где Q_{U3} - мощность, передаваемая по изоляции; $Q_{\Lambda a}$ - мощность, передаваемая по участку горловины Аа; $Q_{\text{экp 3}}$ - мощность, передаваемая к экрану 3; $Q_{\text{экp 4}}$ - мощность, передаваемая к экрану 4; Q_5 - мощность, передаваемая по материалу трубки 5; Q_6 - мощность, передаваемая экраном 6; $Q_{U3\Gamma}$ - мощность, передаваемая жидкому гелию излучением экрана 4; $Q_{\text{Бб}}$ - мощность, передаваемая к жидкому гелию по участку Бб горловины; γ - теплота испарения гелия; m - расход гелия в единицу времени; Δi_5 - изменение энтальпии пара гелия на длине трубки 5; $\Delta i_{\text{Бб}}$ - изменение энтальпии пара на участке горловины Бб; M - количество гелия в криостате; t - время испарения гелия в криостате, (система уравнений (I) справедлива для случая, когда температура экранов 3 и 4 постоянна на всей их длине. Такое допущение можно принять тогда, когда диаметр и толщина материала экранов 3 и 4 намного больше диаметра и толщины материала горловины, что обусловлено конструктивными соображениями).

Используя уравнения Фурье, Стефана-Больцмана и Хогга [3], а также исключая $Q_{\text{экp 3}}$ и $Q_{\text{экp 4}}$, преобразуем систему уравнений (I):

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{U3} \frac{S_{U3}}{e_{U3}} (T_K - T_1) + \frac{m C_p (T_K - T_1)}{\frac{\lambda_{\Lambda a} S_{\Lambda a}}{e} - 1} - m C_p (T_1 - T_{\text{гел}}) &= m \gamma, \\ \lambda_9 \frac{S_9}{e_9} (T_1 - T_2) + \frac{m C_p (T_1 - T_2)}{\frac{\lambda_{\text{тp}} S_{\text{тp}}}{e} - 1} - m C_p (T_2 - T_{\text{гел}}) &= m \gamma, \\ \text{ББ} \xi (T_2^4 - T_{\text{гел}}^4) + \frac{m C_p (T_2 - T_{\text{гел}})}{\frac{\lambda_{\text{Бб}} S_{\text{Бб}}}{e} - 1} - m \gamma &, \\ \frac{M}{t} &= m \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где λ_{U3} - коэффициент теплопроводности изоляции; $\lambda_{\Lambda a}$ - коэффициент теплопроводности

материала горловины на участке Аа; λ_3 - коэффициент теплопроводности материала экрана на 6; λ_{mp} - коэффициент теплопроводности материала трубки 5; $\lambda_{бб}$ - коэффициент теплопроводности материала горловины на участке Бб; T_k, T_1 - температура окружающей среды и экрана 3, соответственно; $T_2, T_{гел}$ - температура экрана 4 и гелия, соответственно; $S_{у3}$ - площадь поверхности экрана 3; $S_{яа}$ - площадь поперечного сечения материала горловины на участке Аа; S_{mp} - площадь поперечного сечения материала трубки 5; S_3 - площадь поверхности экрана 6; $S_{бб}$ - площадь поперечного сечения материала горловины на участке Бб; $\rho_{у3}$ - толщина экранно-вакуумной изоляции; $\rho_{яа}$ - длина участка Аа горловины; ρ_3 - толщина экрана 6; ρ_{mp} - длина трубки 5; $\rho_{бб}$ - длина участка Бб горловины; C_p - теплоемкость пара гелия; ϵ - постоянная Стефана; A, ξ - площадь поверхности и излучательная способность материала гелиевой емкости.

Решая систему уравнений (2), имеем:

$$\left\{ \left[\left(\lambda_{у3} \frac{S_{у3}}{\rho_{у3}} + \frac{MC_p}{t} \right) T_k + \frac{M}{t} (C_p T_{гел} - \gamma) \right] \left[\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \frac{MC_p \rho_{яа}}{t \left(e^{\frac{MC_p \rho_{яа}}{t \lambda_{яа} S_{яа}} - 1} \right)} \right\} \left[\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \left[\lambda_{у3} \frac{S_{у3}}{\rho_{у3}} + \frac{MC_p}{t} + \frac{MC_p}{t} \right] \left[\frac{MC_p}{t} + \lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \frac{M(C_p T_{гел} - \gamma)}{t \left(\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} + \frac{MC_p}{t} \right)} - T_{гел}^4 \left\{ \frac{MC_p}{t} + \frac{MC_p \rho_{бб}}{t \lambda_{бб} S_{бб}} \right\} \quad (3)$$

$$\left\{ \left[\left(\lambda_{у3} \frac{S_{у3}}{\rho_{у3}} + \frac{MC_p}{t} \right) T_k + \frac{M}{t} (C_p T_{гел} - \gamma) \right] \left[\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \frac{MC_p \rho_{яа}}{t \left(e^{\frac{MC_p \rho_{яа}}{t \lambda_{яа} S_{яа}} - 1} \right)} \right\} \left[\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \left[\lambda_{у3} \frac{S_{у3}}{\rho_{у3}} + \frac{MC_p}{t} + \frac{MC_p}{t} \right] \left[\frac{MC_p}{t} + \lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} \right] + \frac{M(C_p T_{гел} - \gamma)}{t \left(\lambda_3 \frac{S_3}{\rho_3} + \frac{MC_p}{t} + \frac{MC_p}{t} \right)} - T_{гел} \right\} = \frac{M\gamma}{t}$$

Уравнение (3) позволяет вычислить время полного испарения гелия в криостате.

Экспериментально был испытан криостат емкостью 20 л. Горловина криостата диаметром 72 мм была изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, а трубка 5 - из того же материала толщиной 0,5 мм. Соответственно длина участка горловины Аа - 200 мм, участка Бб - 40 мм, а трубки 5 - 20 мм. Время полного испарения гелия из криостата равно 120 часам, а вычисленное по формуле (3) - 140 часам. Некоторое расхождение расчетного и экспериментально полученного времени работы криостата объясняется неполным использованием холода пара, что наблюдалось при испытании криостата.

На рис. 2а приведен график расхода гелия (в литрах газа/час), а на рис. 2б - график выхода криостата на режим, снятые экспериментально.

Общий вид криостата приведен на рис. 3, высота его - 700 мм, диаметр - 420 мм, вес - 25 кг.

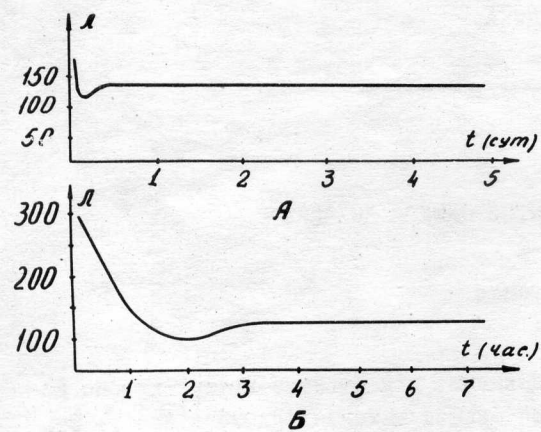


Рис. 2.

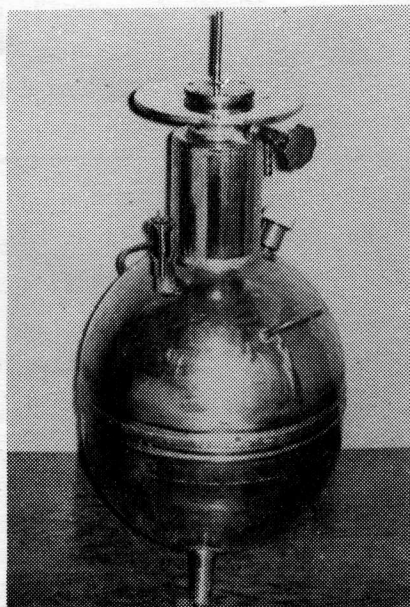


Рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Н. Пренцлау, Ф.Ф. Менде, И.Т. Баранов. "Криогенная и вакуумная техника", вып. П, ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1972.
2. О.П. Анашкин, И.Б. Данилов, В.Г. Кривенко. "Приборы и техника эксперимента", № 6, 149-150, 1964.
3. М.Г. Каганер. "Тепловая изоляция в технике низких температур", "Машиностроение", М., 1966.