ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2027, № 1

ЛАБОРАТОРНАЯ

ТЕХНИКА

УДК 536.581.3

КАМЕРА ИСПАРЕНИЯ “СУХИХ” РЕФРИЖЕРАТОРОВ РАСТВОРЕНИЯ ^{3}He В ^{4}He

©2027 г. Р. Б. Гусев*, А. В. Кутергин, А. М. Тихонов**

Институт физических проблем им. П. Л. Капицы

Российской академии наук

Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

** E-mail: tek@kapitza.ras.ru*

***E-mail: tikhonov@kapitza.ras.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2026

После доработки 22.10.2026

Принята к публикации 02.11.2026

Описана конструкция камеры испарения, которая используется в “сухом” рефрижераторе растворения ^{3}He в ^{4}He, сконструированном для эксплуатации сверхпроводящих вычислительных устройств в окрестности абсолютного нуля температур (порядка 10^{-2} K). Обсуждены оптимальные геометрические параметры испарителя машины растворения такого типа.

Ключевые слова: рефрижератор растворения, криостат, жидкий гелий

1. ВВЕДЕНИЕ

Криогенные машины, основанные на эндотермическом процессе растворения изотопа ^{3}He в ^{4}He, стали незаменимыми для проведения научных исследований при температурах значительно ниже 0.3 К, при которых часто наблюдаются макроскопические квантовые явления. Ранее Эдельман [1] разработал конструкцию малогабаритного криостата растворения, который обеспечивает проведение научных экспериментов в диапазоне температур 0.05–300 К. Этот универсальный и достаточно компактный прибор имеет широкий спектр научно-исследовательских применений: от физики твердого тела [2] до астрономических наблюдений [3]. Однако существенно ограничивающим практическое применение параметром этой криогенной машины является ее относительно небольшая холодопроизводительность $\dot{Q} < 1$ мкВт.

В России оказались особенно сильно востребованы отечественные рефрижераторы с минимальной температурой камеры растворения T_{mc} ~ 10 мК с относительно большим экспериментальным объемом (диаметр фланца для крепления образцов не менее 400 мм) и высокой холодопроизводительностью ($\dot{Q} \geq 400$ мкВт при T = 0.1 К). Недавно в рамках опытно-конструкторских работ МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ООО “Криотрейд инжиниринг” и ФГУП ВНИИА разработаны российские сухие криостаты [4]. Авторы приняли активное участие в проектировании, разработке технологий и производстве ступени растворения для сухого рефрижератора растворения ^{3}He в ^{4}He (см. рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид сухого рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He с высокой холодопроизводительностью

В работе описана конструкция камеры испарения, которая является одним из ключевых узлов машины растворения с высокой холодопроизводительностью. Криостат разработан для эксплуатации сверхпроводящих вычислительных устройств в окрестности абсолютного нуля (T ~ 10^{-2} K) [5]. Такие низкие температуры нужны для подавления теплового шума, влияющего на работу джозефсоновских кубитов [6]. Более того, достижение существенной вычислительной мощности таких устройств подразумевает одновременное использование значительного количества кубитов с большим числом подводящих линий (более 100). По этой причине для нейтрализации потока тепла по подводящим проводам необходима достаточно высокая холодопроизводительность камеры испарения.

2. КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ

Идея использования эндотермического процесса растворения изотопа ^{3}He в ^{4}He для получения сверхнизких температур принадлежит Лондону [7], она была развита в работе [8]. Первая практическая реализация метода осуществлена в работах [9, 10]. Подробнее различные конструкции криогенных машин растворения рассмотрены, например, в книге Лоунасмаа [11]. Последнее существенное развитие конструкции рефрижератора растворения было осуществлено Улихом, который разработал так называемый “сухой” криостат [12, 13]. В этом случае у пользователя отпадает необходимость контроля уровня и пополнения запасов криогенных жидкостей во внешнем контуре охлаждения.

Существенным отличием классического криостата от “сухого” является отсутствие “градусной” камеры (камера откачки паров жидкого ^{4}He с температурой порядка 1 К) [14]. В этом случае камера испарения используется не только для откачки паров гелия, но и для предварительного охлаждения и конденсации циркулирующей в холодильной машине смеси изотопов, поступающих в камеру растворения [12]. При циркуляции He $\dot{n} \approx 1$ ммоль/с и температуре камеры испарения T_{still} ~ 0.7 К необходимая для функционирования

рефрижератора холодопроизводительность камеры испарения составляет порядка десятка милливатт. В этой связи возникает вопрос об оптимальных геометрических размерах камеры, которые определяют необходимое для работы криостата количество дорогостоящего компонента системы – изотопа ^{3}He (порядка 1 моль).

На рис. 2 показан эскиз цилиндрической камеры испарения *1* диаметром 5 см и высотой 5 см, корпус которой изготавливается из нержавеющей стали. Отметим, что предварительно газообразная смесь изотопов гелия охлаждается в теплообменнике парами испаряющейся жидкости до температуры ниже температуры инверсии ^{3}He, которая составляет примерно 3.5 K. Далее смесь газов дросселируется и проходит через спиральный трубчатый теплообменник *2*, расположенный на дне камеры испарения, который, в свою очередь, запирается вторым дросселем (импедансом). Таким образом, теплообменник является дополнительной тепловой нагрузкой – важнейшим компонентом обратной связи рефрижератора. Откачка паров гелия из камеры испарения происходит через трубу *3* с внутренним диаметром 16 мм, в которой имеется диафрагма *4* для подавления сверхтекучей пленки ^{4}He. Крепится камера *1* восемью болтами М5 к медному фланцу *5*, который, в свою очередь, винтами крепится к медной пластине большого диаметра (около 400 мм), задающей условный уровень температуры 1 К в машине растворения. Пластина необходима для отвода и нейтрализации паразитного теплопритока, идущего сверху вниз к камере растворения по конструктивным элементам, каналам циркуляции изотопа ^{3}He и измерительным линиям пользователя.

Рис. 2. Эскиз камеры испарения:

Таким образом, при проектировании камеры испарителя встает вопрос о ее оптимальной геометрии и минимально допустимой площади поверхности жидкости в ней. Для оценки площади поверхности смеси жидкого гелия можно воспользоваться формулой Ленгмюра для скорости откачки газов [15]:

$$\dot{n}_3 + \dot{n}_4 = 2.48S(P_3(T) + P_4(T) - P_0)T^{\frac{1}{2}}, \qquad (1)$$

где T – температура испарителя, $\dot{n}_3$ и $\dot{n}_4$ [моль/с] – циркуляции для ^{3}He и ^{4}He соответственно, S [м^2] – площадь поверхности жидкости, $P_3(T)$, $P_4(T)$ – парциальные равновесные давления ^{3}He и ^{4}He соответственно, P_0 [Па] – давление смеси в испарителе при откачке.

Равновесное давление смеси паров ^{3}He + ^{4}He в камере испарения зависит от температуры и концентрации ^{3}He в жидкой фазе, которая, в свою очередь, зависит от температуры камеры растворения T_{mix}. На рис. 3 приведены зависимости равновесных давлений смеси паров изотопов гелия в диапазоне температур T_{still} от 0.6 до 0.1 К при температуре T_{mix} =10, 100 мК, а также для сравнения давления насыщенных паров чистых ^{3}He и ^{4}He [16, 17].

Рис. 3. Зависимость равновесного давления насыщенных паров от температуры для ^{3}He...

В режиме достижения предельно низкой температуры T_{mix} ~ 10 мК с характерной тепловой нагрузкой на камеру растворения менее 1 мкВт циркуляция составляет $\dot{n}_3$ ~ 0.3–0.5 ммоль/с при T_{still} ~ 0.65–0.8 К. В диапазоне 0.6 – 0.8 К выполняется условие $P_3(T) >> P_4(T)$, молярная концентрация ^{3}He в паре выше 90%, тогда формулу (1) можно упростить:

$$\Delta P \approx P_3(T) - P_0 \approx \frac{\dot{n}T^{\frac{1}{2}}}{2.48S}, \qquad (2)$$

где $\dot{n} = \dot{n}_3 + \dot{n}_4 \approx \dot{n}_3$.

На рис. 4 показаны зависимости $\Delta P/P_3$ при $\dot{n} \approx 0.5$ ммоль/с и площадях поверхности жидкости S в испарителе 10, 20 и 50 см^2. Согласно рис. 4, даже для достаточно маленького диаметра испарителя (10 см^2) разница давлений, необходимая для потока $\dot{n} \approx 0.5$ ммоль/с, составляет проценты от величины давления насыщенных паров, т. е. жидкость практически всегда находится в состоянии, близком к ее равновесному состоянию с паром. Таким образом, площадь поверхности S не является ограничивающим фактором при выборе конструкции испарителя.

Рис. 4. Зависимость $\Delta P/P_3$от T при $\dot{n} \approx 0.5$ ммоль/с и следующих значениях площади S...

В режиме высокой холодопроизводительности характерная тепловая нагрузка на камеру растворения составляет порядка 100 мкВт, T_{mix} ~0.1 К, а циркуляция $\dot{n} \approx 1$ ммоль/с при T_{still} = 0.8–1.2 К, и требования к площади поверхности жидкости еще ниже.

Однако другим ограничением при выборе конструкции испарителя может являться температурный скачок между пластиной испарителя (дном камеры) и жидкостью из-за теплового сопротивления Капицы. Для величины скачка на границе металл–жидкий гелий имеем

$$\Delta T = \frac{Q}{S} R_{\text{К}}\ , \qquad (3)$$

где $\dot{Q}$ – мощность, отводимая от одноградусной пластины через дно испарителя площадью S, $R_{\text{К}}$ – сопротивление Капицы. В температурном диапазоне 0.6–1.2 К для контакта смеси изотопов гелия с концентрацией ^{3}He менее 1% и гладкой медной поверхности параметр $R_{\text{К}}$ находится в диапазоне 70–200 см^2 ·К·Вт$^{-1}$, уменьшаясь с ростом температуры [18], что дает скачок температуры 10^{-4} мК на 1 мВт отводимой мощности при S~20 см^2. Уменьшить разницу температур, не изменяя геометрию, можно, создав спеченный теплообменник из медного или бронзового порошка на дне камеры испарения. Исходя из этого можно сделать вывод, что данный фактор также не является ограничивающим при проектировании, так как даже при росте тепловой нагрузки от экспериментальных линий в несколько раз на фланцах диаметром

2–5 см градиент температур на границе между жидкостью и фланцем может составлять всего лишь сотые доли Кельвина.

Таким образом, при выборе габаритных размеров камеры испарения необходимо учитывать два фактора. Во-первых, это объем жидкого гелия, который ее наполняет, так как при отогреве криостата газообразная смесь ^{3}He и ^{4}He собирается и хранится в ресиверах ограниченного объема. Во-вторых, это размещение в камере донного спирального теплообменника из медной трубки длиной в несколько метров с характерным диаметром 1–3 мм.

Наконец, важным свойством рефрижератора растворения является то, что сильное магнитное поле практически не оказывает влияния на его характеристики. Существенная холодопроизводительность разработанного сухого криостата [4] позволяет охлаждать массивные экспериментальные сборки до $T \sim 10^{-2}$ K, и эти сборки далее могут использоваться, например, для получения температур $T < 10^{-3}$ K методом ядерного адиабатического размагничивания [14, 19]. Недавно с помощью этого метода получения сверхнизких температур были обнаружены новые сверхтекучие фазы жидкого ^{3}He [20].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эдельман В.С.* ПТЭ. 2009. № 2. С. 159. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13066859 [Edelman V.S. Instrum. Exp. Tech. 2009. V. 52. P. 301. https://doi.org/10.1134/S002044120902033X]
2. *Смирнов А.И., Солдатов Т.А., Эдельман В.С.* ПТЭ. 2022. № 4. С. 131. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48867788 [*Smirnov A.I., Soldatov T.A., Edelman V.S.* Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. P. 668. https://doi.org/10.1134/S0020441222040236]
3. *Марухно А.С., Эдельман В.С.* ПТЭ. 2024. № 5. С. 214. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80453886 [*Marukhno A.S., Edelman V.S.* Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67. P. 1059. https://doi.org/10.1134/S0020441224701604]

4. *Тихонов А.М., Гусев Р.Б., Болдарев С.Т. и др.* УФН. 2025. № 7. С. 787. https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039846
[*Tikhonov A.M., Gusev R.B., Boldarev S.T. et al.* Phys.-Usp. 2025. V. 68, P. 736. https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039846]
5. Квантовые сопроцессоры SnowDrop, НОЦ "Функциональные Микро/Наносистемы" МГТУ им. Н. Э. Баумана (2026). https://octillion.bmstu.ru/
6. *Wendin G.* Rep. Prog. Phys. 2017. V. 80 P. 106001. https://doi.org/10.1088/1361-6633/aa7e1a
7. *London H.* Proc. Int. Conf. On Low Temp. Phys. Oxford: Clarendon Press Laboratory, 1951. P. 157.
8. *London H., Clarke G.R., Mendoza E.* Phys. Rev. 1962. V. 128. P. 1992. https://doi.org/10.1103/PhysRev.128.1992
9. *Das P., De Bruyn Ouboter R., Taconis K.W.* Proc. 9th Int. Conf. On Low Temp. Phys. London: Plenum Press, 1965. P. 1253.
10. *Неганов Б.С., Борисов Н., Либург М.* ЖЭТФ. 1966. Т. 50. С. 1445
[*Neganov B., Borisov N., Liburg M.* Sov. Phys. JETP. 1966. V. 23. P. 959.]
11. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир. 1977. [*Lounasmaa O.V.* Experimental principles and methods below 1 K. London and New York: Academic press. 1974.]
12. *Uhlig K.* Cryogenics. 1987. V. 27. P. 454.
13. *Uhlig K.J.* Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 400. 052039. https://doi.org/10.1088/1742-6596/400/5/052039
14. *Боровик-Романов А.С., Буньков Ю.М., Дмитриев В.В., Мухарский Ю.М., Твалашвили Г.К.* ПТЭ. 1985. № 3. С. 185.
[*Borovik-Romanov A.S., Bun'kov Yu. M., Dmitriev V. V., Mukharskii Yu. Tvalashvili G. K.* Instrum. Exp. Tech. 1985. V. 28. P. 70]
15. *Frossati G.* Proc. ULT Hakone Symposium. 1977. P. 205.
16. *Radebaugh R.* Thermodynamic properties of He3-He4 solutions with applications to the He3–He4 dilution refrigerator. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 1967. https://doi.org/10.6028/NBS.TN.362
17. *Малков М.П. и др.* Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985.
18. *Зиновьева К.Н.* Кинетические и поверхностные явления в квантовых жидкостях. Дис. … докт. физ.-мат. наук. М.: ИФП РАН, 1981.

19. *Berglund P.M., Ehnholm G.J., Gylling R.G., Lounasmaa O.V., Svik R.P.* Proc. 1970 Ultralow Temperature Symposium. Eds. R.A. Hein, D.U. Gubser, E.H. Takken. Washington D.C.: Naval Research Laboratory Report, 1970. V. 7133. P. 113.
20. *Дмитриев В.В., Петрова Д.В., Солдатов А.А., Юдин А.Н.* УФН. 2024. V. 194. P. 1310. https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039760
[*Dmitriev V.V. Petrova D. V., Soldatov A. A., Yudin A. N.* Phys.-Usp. . 2024. V. 67. P. 12. https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.07.03976012]

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Внешний вид сухого рефрижератор растворения ^{3}He в ^{4}He с высокой холодопроизводительностью

Рис. 2. Эскиз камеры испарения: *1* – корпус из нержавеющей стали, *2* – спиральный трубчатый теплообменник, *3* – труба откачки, *4* – диафрагма, *5* – медный фланец основания камеры

Рис. 3. Зависимость равновесного давления насыщенных паров от температуры для ^{3}He (точки), ^{4}He (квадраты), а также смеси изотопов гелия в камере испарения при T_{mix}=10 мК (полые треугольники) и T_{mix}=100 мК (сплошные треугольники)

Рис. 4. Зависимость $\Delta P/P_3$от T при $\dot{n} \approx 0.5$ ммоль/с и значениях площади S = 10 см^2 (квадраты), 20 см^2 (точки), 50 см^2 (треугольники)



Рис. 1.

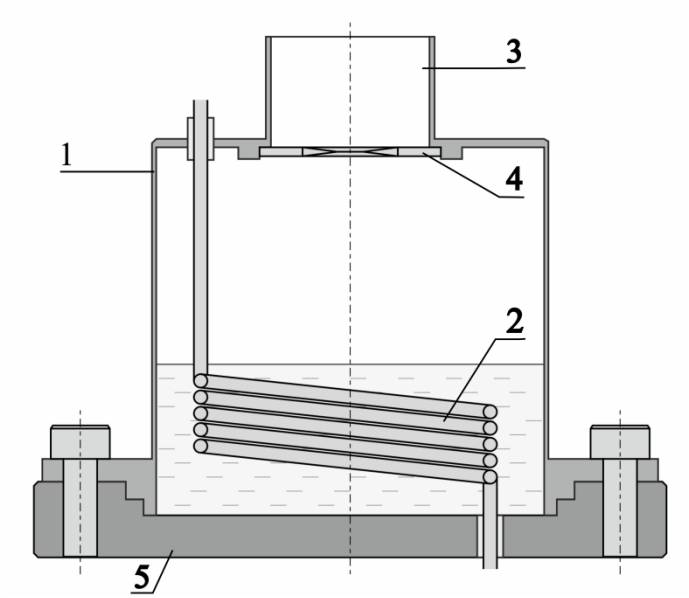


Рис. 2.

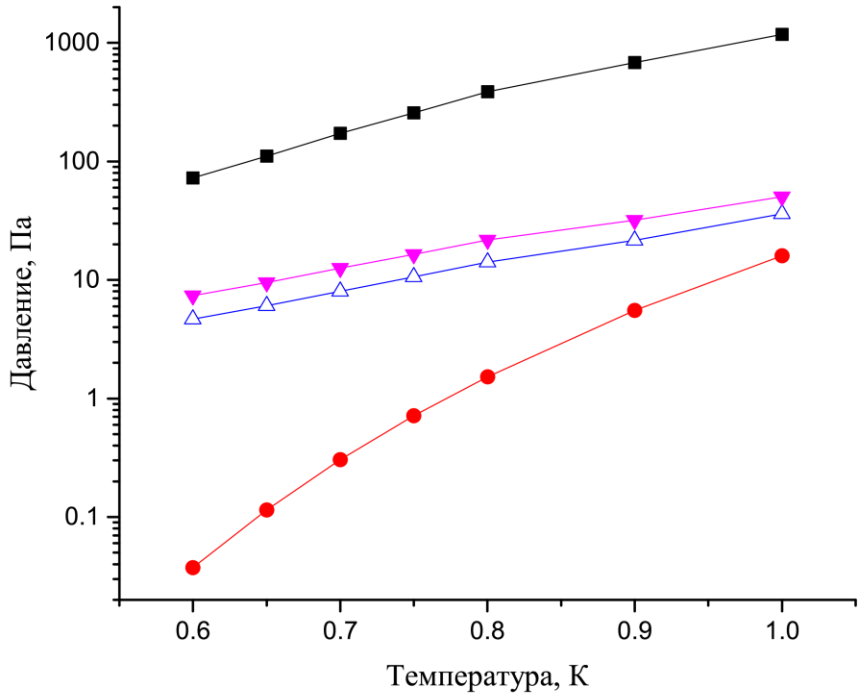


Рис. 3.

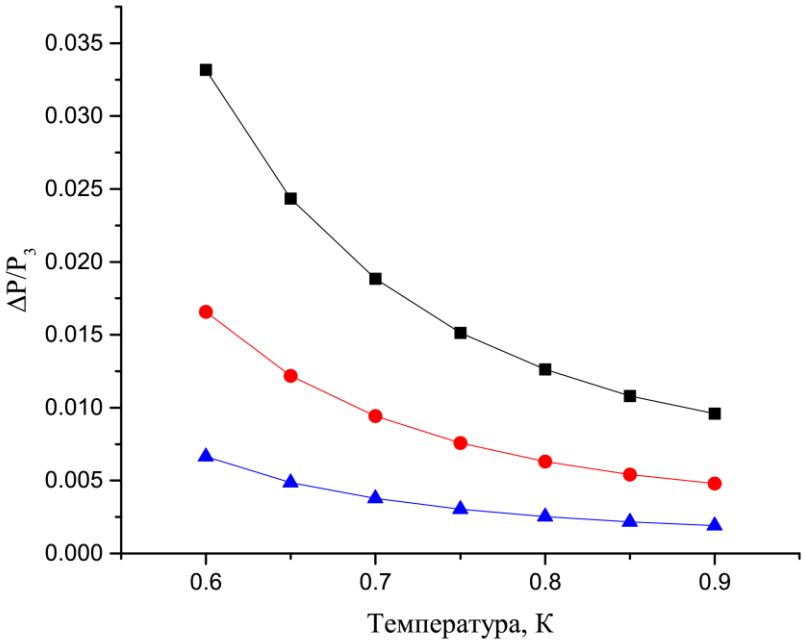

0.035
0.030
0.025
0.020
0.015
0.010
0.005
0.000
ΔP/P3
0.6
0.7
0.8
0.9
Температура, К

Рис. 4.