

Рефрижератор растворения ^3He в ^4He высокой холодопроизводительности*

А.М. Тихонов, Р.Б. Гусев, С.Т. Болдарев, И.А. Родионов, Д.А. Фокин,
В.В. Ечеистов, С.В. Сорокин, Ю.А. Горлов, А.А. Добрецов

Статья написана на основе доклада на Научной сессии ОФН РАН, посвящённой 90-летию основания Института физических проблем П.Л. Капицы. Традиционной областью прикладных работ в ИФП РАН является научно-исследовательская и конструкторская разработка низкотемпературной техники. В 2022 г. США и ЕС наложили запрет на высокотехнологичный экспорт в РФ, в который также включено криогенное оборудование. В работе представлены результаты испытания отечественного рефрижератора высокой холодопроизводительности, основанного на эндотермическом процессе растворения изотопа ^3He в ^4He .

Ключевые слова: жидкий гелий, рефрижератор растворения, гелий-3

PACS number: 07.20.Mc

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039846>

Содержание

1. Введение (787).
 2. Рефрижератор растворения (788).
- Список литературы (789).

1. Введение

Традиционной областью прикладных работ в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (ИФП РАН) является научно-исследовательская и конструкторская разработка криогенного оборудования [1]. Эти работы внесли значительный вклад в науку, технику и обороноспособность СССР. К примеру, за успешное создание и внедрение нового турбинного метода получения кислорода для промышленных нужд в 1945 г. основателем института академику П.Л. Капице присвоено звание Героя Социалистического Труда, а возглавляемый им ИФП РАН был удостоен ордена Трудового Красного Знамени [2]. В начале 2022 г. США и ЕС наложили

запрет на высокотехнологичный экспорт в РФ, в который также входит криогенное оборудование. Более того, летом 2023 г. ИФП РАН был включён в санкционный SDN список Госдепа США [3]. В связи с этим некоторые виды низкотемпературной техники стали недоступны для российских исследователей и возникла острая необходимость в разработке и производстве отечественных аналогов.

Криогенные машины, основанные на эндотермическом процессе растворения изотопа ^3He в ^4He , стали незаменимыми для проведения научных исследований при температурах T значительно ниже 0,3 К, при которых часто могут наблюдаться макроскопические квантовые явления. Ранее в ИФП РАН была разработана конструкция малогабаритного криостата растворения, обеспечивающего проведение научных экспериментов в диапазоне температур 0,05–300 К [4]. Такой универсальный и достаточно компактный прибор имеет широкий спектр научно-исследовательских применений от физики твёрдого тела [5] до астрономических наблюдений [6]. Однако существенно ограничивающим практическое применение параметром этой криогенной машины является её относительно небольшая холодопроизводительность $\dot{Q}$ (< 1 мкВт).

На данный момент основными производителями криостатов растворения ^3He в ^4He большой холодопроизводительности являются Bluefors (Финляндия, www.bluefors.com) и Oxford Instruments (Великобритания, www.oxinst.com). Рефрижераторы указанных иностранных производителей работают в диапазоне от $\sim 0,1$ К до ~ 5 мК, при этом $\dot{Q}$ таких машин варьируется в диапазоне от 0,1 до 1 мВт при температуре камеры растворения $T_{\text{mc}} = 0,1$ К. В условиях масштабных санкций со стороны коллективного Запада в Российской Федерации оказались особенно сильно востребованы отечествен-

А.М. Тихонов^(1,*), Р.Б. Гусев⁽¹⁾, С.Т. Болдарев⁽¹⁾,
И.А. Родионов^(2,3), Д.А. Фокин^(2,3), В.В. Ечеистов^(2,3),
С.В. Сорокин^(2,3), Ю.А. Горлов⁽⁴⁾, А.А. Добрецов⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
ул. Косыгина 2, 119334 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул. 5/1, 105005 Москва, Российская Федерация

⁽³⁾ Федеральное государственное унитарное предприятие
"Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова",
Сушёвская ул. 22, 127030 Москва, Российская Федерация

⁽⁴⁾ ООО "Криотрейд инжиниринг",
ул. Габричевского 5, кор. 1, помещ. 1/2, 125367 Москва,
Российская Федерация

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

Статья поступила 18 декабря 2024 г.

* Статья написана на основе доклада, представленного на совместном заседании Научной сессии Отделения физических наук РАН и Учёного совета Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, посвящённого 90-летию ИФП РАН, 18 декабря 2024 г. (см. УFN 195 (7) 747 (2025)).



Рис. 1. Рефрижератор растворения ^3He в ^4He высокой холодопроизводительности.

ные рефрижераторы с минимальной температурой камеры растворения $T_{\text{mc}} \sim 10$ мК, с относительно большим экспериментальным объёмом (диаметр фланца для крепления образцов не менее 400 мм) и с высокой холодопроизводительностью ($\dot{Q} \geq 400$ мВт при 0,1 К). Недавно в рамках опытно-конструкторских работ Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана совместно с Федеральным государственным унитарным предприятием "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова" и ООО "Криотрейд инжиниринг" разработаны российские сухие криостаты высокой холодопроизводительности. ИФП РАН принял активное участие в проектировании, разработке технологий и производстве ступени растворения для рефрижератора (рис. 1), который призван заместить продукцию иностранных производителей. Некоторые результаты испытаний этой холодильной машины приводятся ниже.

2. Рефрижератор растворения

Идея использования эндотермического процесса растворения изотопа ^3He в ^4He для получения сверхнизких температур принадлежит Лондону [7], она была развита в работе [8]. Первая практическая реализация метода осуществлена в работах [9, 10]. Позднее в работе Эдельмана [11] был реализован режим непрерывно действующего криостата, в котором температура циркулирующего ^3He никогда не поднимается выше 1 К. Подробнее различные конструкции криогенных машин растворения рассмотрены, например, в книге Лоуна-маа [12]. Дальнейшее существенное развитие конструкции

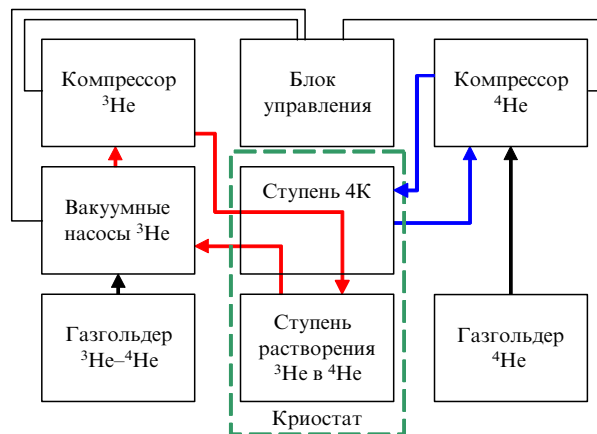


Рис. 2. Блок-схема рефрижератора растворения ^3He в ^4He .

рефрижератора растворения было осуществлено Улихом, разработавшим так называемый "сухой криостат" [13, 14]. В данном случае пользователь полностью избавлен от необходимости как контролировать наличие, так и поддерживать необходимый уровень криогенных жидкостей во внешнем контуре охлаждения.

Блок-схема холодильной машины растворения представлена на рис. 2. В конструкции рефрижератора имеются два контура циркуляции газов, которая осуществляется с помощью компрессоров и безмасленных вакуумных насосов (спирального и турбомолекулярного). Управление последними, а также клапанами газгольдеров для ^4He и смеси газов ^3He – ^4He осуществляется с помощью блока управления. Синим цветом (справа) обозначен контур циркуляции изотопа ^4He , который задействован в работе криогенной машины Гиффорда–МакМагона [15] или Стирлинга [16]. В стационарном режиме гелий в этом контуре частично конденсируется в ступени 4 К. Таким образом, с помощью первого контура осуществляется предварительное охлаждение до $T \sim 4$ К газовой смеси изотопов гелия, циркулирующей по второму замкнутому контуру (слева, красные стрелки). В стационарном режиме работы машины растворения ($T_{\text{mc}} \leq 0,1$ К) практически весь изотоп ^4He (бозе-частицы) конденсируется в каналах ступени растворения в сверхтекучее состояние [17, 18] (конденсат Бозе–Эйнштейна) и по второму контуру циркулирует, фактически, только газ ферми-частиц ^3He .

Таким образом, холодопроизводительность рефрижератора $\dot{Q}$ задаётся циркулирующей $\dot{n}$ изотопа ^3He в системе следующим образом:

$$\dot{Q} \approx 82 T_{\text{mc}}^2 \dot{n} - 5,2 \times 10^2 \frac{R_{\text{km}}}{A} \dot{n}^2 - \dot{Q}_0, \quad (1)$$

где первый член описывает поглощение тепла при растворении ^3He в ^4He , а второй — рекуперацию тепла в теплообменниках (R_{km} — усреднённое значение сопротивления Капицы поверхности, через которую происходит теплообмен; A — площадь поверхности теплообмена). Третий член $\dot{Q}_0$ описывает неустраняемый паразитный теплоприток. Формально (1) выведено для случая непрерывного теплообменника с оптимальным распределением площади поверхности [19], но с некоторыми ограничениями она также верна и для случая набора ступенчатых теплообменников [20].

На рисунке 3 красными точками представлены результаты теста конструкции (см. рис. 1) при $\dot{n} \approx 0,35$ ммоль с^{-1} . Для сравнения чёрными квадратами показаны данные из работы [20], а непрерывная кривая — расчёт для них по (1) при $\dot{Q}_0 = 0,2$ мВт.

В заключение отметим перспективность применения разработанного рефрижератора растворения, например, для функционирования сверхпроводящих вычислительных устройств в окрестности абсолютного нуля температур ($T \sim 10^{-2}$ К).

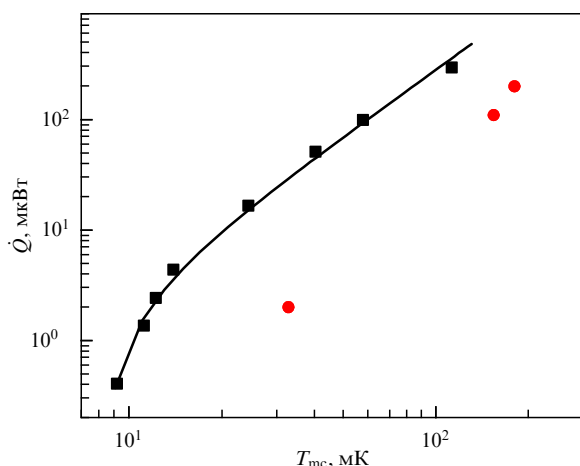


Рис. 3. Зависимость холодопроизводительности $\dot{Q}$ от температуры камеры растворения $T_{\text{мс}}$ при постоянной циркуляции ^3He $\dot{n} \approx 0,35$ ммоль с^{-1} : чёрные квадраты — данные из работы [20], а красные точки — результаты теста опытного образца. Непрерывная кривая — расчёт по (1).

Столь низкие температуры нужны для подавления теплового шума, влияющего на работу джозефсоновских кубитов [21]. Более того, для получения существенной вычислительной мощности таких устройств необходимо одновременное использование значительного количества кубитов (> 100), что связано с наличием большого числа подводящих линий. По последней причине для нейтрализации потока тепла по подводящим проводам необходима особенно высокая холодопроизводительность.

Другим преимуществом рефрижератора растворения является то, что сильное магнитное поле практически не оказывает влияния на его характеристики. Существенная холодопроизводительность разработанного криостата позволяет охлаждать массивные экспериментальные сборки, которые могут использоваться, например, для получения температур $T < 10^{-3}$ К методом ядерного адиабатического размагничивания [20, 22]. Недавно с помощью этого метода получения сверхнизких температур были обнаружены новые сверхтекучие фазы жидкого ^3He [23].

Благодарности. Участие ИФП РАН осуществлялось при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию. Участие МГТУ им. Н.Э. Баумана поддержано субсидией Министерства науки и высшего образования РФ в целях

реализации программы приборостроения на 2022–2025 гг. в рамках Государственной программы "Научно-техническое развитие РФ".

Список литературы

- Капица П Л УФН **16** 145 (1936); Kapitza P *Proc. R. Soc. Lond. A* **147** 189 (1934)
- Капица П Л УФН **164** 1263 (1994); Kapitza P L *Phys. Usp.* **37** 1173 (1994)
- Sanctions List Search. Office of Foreign Assets Control, <https://sanctionssearch.ofac.treas.gov/Details.aspx?id=41876>
- Эдельман В С *Приборы и техника эксперимента* (2) 159 (2009); Edelman V S *Instrum. Exp. Tech.* **52** 301 (2009)
- Смирнов А И, Солдатов Т А, Эдельман В С *Приборы и техника эксперимента* (4) 131 (2022); Smirnov A I, Soldatov T A, Edelman V S *Instrum. Exp. Tech.* **65** 668 (2022)
- Марухно А С, Эдельман В С *Приборы и техника эксперимента* (5) 214 (2024); Marukhno A S, Edelman V S *Instrum. Exp. Tech.* **67** 1059 (2024)
- London H, in *Proc. of the Intern. Conf. on Low Temperature Physics, Oxford, August 22–28, 1951* (Ed. R Bowers) (Oxford: Clarendon Press, 1951) p. 157
- London H, Clarke G R, Mendoza E *Phys. Rev.* **128** 1992 (1962)
- Das P, De Bruyn Ouboter R, Taconis K W, in *Low Temperature Physics LT9. Proc. of the IXth Intern. Conf. on Low Temperature Physics, Columbus, Ohio, August 31–September 4, 1964* (Eds J G Daunt et al.) (New York: Springer, 1965) p. 1253, https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6443-4_133
- Неганов Б С, Борисов Н, Либург М ЖЭТФ **50** 1445 (1966); Neganov B, Borisov N, Liburg M *Sov. Phys. JETP* **23** 959 (1966)
- Edel'man V S *Cryogenics* **12** 385 (1972)
- Lounasmaa O V *Experimental Principles and Methods Below 1 K* (London: Academic Press, 1974); Пер. на русск. яз.: Лоунамаа О В *Принципы и методы получения температур ниже 1 К* (М.: Мир, 1977)
- Uhlir K *Cryogenics* **27** 454 (1987)
- Uhlir K J. *Phys. Conf. Ser.* **400** 052039 (2012)
- McMahon H O, Gifford W E, in *Advances in Cryogenic Engineering. Proc. of the 1959 Cryogenic Engineering Conf., Berkeley, California September 2–4, 1959* (Vol. 5, Ed. K D Timmerhaus.) (New York: Springer, 1960) p. 354, https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0537-9_43
- Radebaugh R J. *Phys. Condens. Matter* **21** 164219 (2009)
- Kapitza P L *Nature* **141** 74 (1938)
- Ландау Л Д ЖЭТФ **11** 592 (1941); Landau L J. *Phys. USSR* **5** 71 (1941)
- Frossatti G J. *Phys. France* **39** C6-1578 (1978)
- Боровик-Романов А С и др. *Приборы и техника эксперимента* (3) 185 (1985); Borovik-Romanov A S et al. *Instrum. Exp. Tech.* **28** 707 (1985)
- Wendin G *Rep. Prog. Phys.* **80** 106001 (2017)
- Berglund P M et al., in *Proc. 1970 Ultralow Temperature Symp. (Report No. 7133, Eds R A Hein, D U Gubser, E H Takken)* (Washington, DC: Naval Research Laboratory, 1970) p. 113
- Дмитриев В В и др. УФН **194** 1310 (2024); Dmitriev V V et al. *Phys. Usp.* **67** 1239 (2024)

High cooling capacity ^3He – ^4He dilution refrigerator

A.M. Tikhonov^(1,*), R.B. Gusev⁽¹⁾, S.T. Boldarev⁽¹⁾, I.A. Rodionov^(2,3), D.A. Fokin^(2,3), V.V. Echeistov^(2,3), S.V. Sorokin^(2,3), Yu.A. Gorlov⁽⁴⁾, A.A. Dobretsov⁽⁴⁾

⁽¹⁾ P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 2, 119334 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Bauman Moscow State Technical University, ul. 2-ya Baumanskaya 5/1, 105005 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute, ul. Sushchevskaya 22, 127030 Moscow, Russian Federation

⁽⁴⁾ Cryotrade Engineering LLC, ul. Gabrichевского 5, kor. 1, 125367 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(*) tikhonov@kapitza.ras.ru

The paper is based on a report presented at the scientific session of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences dedicated to the 90th anniversary of the founding of the P.L. Kapitza Institute for Physical Problems of the Russian Academy of Sciences (IPP RAS). The traditional area of applied research at the IPP RAS is the study and development of low-temperature equipment. In 2022, the United States and the EU imposed sanctions on high-tech exports to the Russian Federation, which included cryogenic equipment. This paper presents the results of testing a promising domestic high cooling capacity refrigerator based on endothermic dilution of the isotope ^3He in ^4He .

Keywords: liquid helium, dilution refrigerators, helium-3

PACS number: 07.20.Mc

Bibliography — 23 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **195** (7) 787–789 (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039846>

Received 18 December 2024

Physics – Uspekhi **68** (7) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039846>