

УДК 539.1.074.8

РЕФРИЖЕРАТОР ^3He НА ОСНОВЕ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИОКУЛЕРОМ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

© 2023 г. А. Н. Черников^{а, *}

^аОбъединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Московская область, 141980 Россия

*e-mail: chern@nf.jinr.ru

Поступила в редакцию 14.08.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.

Принята к публикации 25.10.2022 г.

В Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований ведутся работы по созданию газовых детекторов нейтронов. Для приготовления рабочей смеси газов необходимо использовать чистый ^3He , который получают путем вымораживания примесей. Для этой цели создан рефрижератор ^3He . Рефрижератор также может использоваться для получения низких температур в физическом эксперименте. В настоящей работе исследованы режимы работы рефрижератора. В непрерывном режиме циркуляции ^3He получена температура 0.78 К. При откачке паров ^3He внешним насосом в разовом режиме охлаждения достигается температура 0.52 К. В работе также изучены релаксационные режимы, в которых в случае предварительно сконденсированного ^3He роль насоса выполняет объем контейнера. Приведен режим, в котором температура испарителя релаксирует от 1 до 1.5 К в течение 11 суток.

Ключевые слова: сверхнизкие температуры, гелий-3, криокулеры, насос с активированным углем.

DOI: 10.31857/S1028096023040040, **EDN:** KBSFHP

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ЛНФ ОИЯИ) традиционно развивается направление разработки газонаполненных детекторов тепловых нейтронов [1–3]. Одним из компонентов смеси газов, наполняющих такие детекторы, является ^3He . Технология сборки детектора подразумевает добавление чистого ^3He в заранее подготовленную смесь остальных газов. По истечении срока службы необходимо повторное заполнение детектора смесью газов. В силу высокой цены ^3He использование для этих целей нового объема заводского ^3He высокой чистоты очень дорогостоящее. Более рациональным представляется извлечение ^3He из использованной ранее в детекторе смеси путем его вымораживания. Для этого смесь газов необходимо охлаждать до температур ниже 3.3 К, отвечающих жидкому состоянию ^3He . Эти температуры можно получить в гелиевых криостатах или с использованием криокулеров замкнутого цикла, например, типа Гиффорда–Макмагона (ГМ), и совмещая с ними рефрижератор, в котором происходит сжижение ^3He , а также откачка его паров.

В настоящей работе описана конструкция рефрижератора ^3He , предназначенного для очистки ^3He от примесей, с охлаждением криокулером ГМ. Также рассмотрены режимы работы этого рефрижератора, которые могут быть полезны для проведения нейтронных экспериментов с низкими температурами в области 1 К и ниже.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Конструкцию установки во многом определил накопленный в ЛНФ ОИЯИ опыт использования криокулеров [4–6]. Так, в [4] исследовали шахтный криостат с вертикальной загрузкой для размещения образцов диаметром до 120 мм в холодной зоне. В этой конструкции шахта была изготовлена из тонкостенной трубы диаметром 150 мм из нержавеющей стали. Тепловой контакт образца со второй ступенью холодной головки криокулера обеспечивали с помощью теплообменного газа ^4He при давлении 1–10 мбар. При мощности холодной головки 0.7 Вт (температура 4.2 К), которая использовалась в криостате, финальная температура достигала 5 К. Она была ограничена конструктивными особенностями криостата, и влияние теплообменного газа на нее не было от-

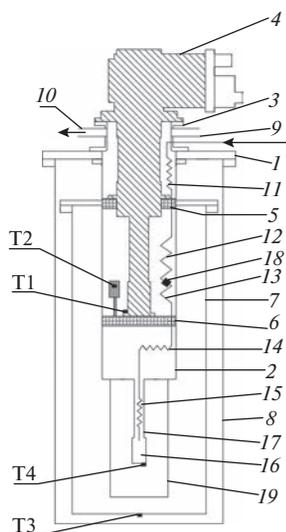


Рис. 1. Схема криостата с рефрижератором ^3He : 1 – основной фланец; 2 – контейнер; 3 – коллектор криостата; 4 – холодная головка; 5, 6 – теплообменники; 7 – тепловой экран; 8 – вакуумный корпус криостата; 9 – трубка; 10 – патрубок; 11–14 – секции теплообменника; 15 – дроссель; 16 – испаритель; 17 – тонкостенная трубка; 18 – насос с активированным углем; 19 – тепловой экран; T1, T2, T3 – кремниевые диоды; T4 – терморезистор.

мечено. В дальнейшем были проведены измерения теплопритока вдоль шахты в диапазоне давлений 1–20 мбар при использовании теплообменного газа ^4He [5]. Величина этого теплопритока оказалась незначительной и практически не влияла на конечную температуру.

На основании этих измерений было принято решение поместить регенеративную часть холодной головки внутрь вертикальной шахты, аналогичной по размерам шахте в [4]. При заполнении шахты газообразным гелием с давлением до 20 мбар следовало ожидать, что криокулер будет работать без существенной потери холодопроизводительности.

В настоящей работе криостат был оснащен криокулером ГМ производительностью 1.5 Вт при 4.2 К. На холодной головке криокулера был размещен рефрижератор ^3He . Холодная головка и узлы рефрижератора были ориентированы вертикально сверху вниз. Конструкция криостата представлена на рис. 1. Рефрижератор ^3He представляет собой колонку теплообменников, расположенных на регенеративной части холодной головки. Внизу основного фланца 1 смонтирован контейнер 2, труба диаметром 150 мм из тонкостенной нержавеющей стали и длиной 390 мм. На коллекторе криостата 3 соосно с контейнером 2 установлена холодная головка 4. Длину контейнера определяли исходя из требования размещения в ней холодной головки и теплообменников.

На первую и вторую ступень установлены теплообменники 5 и 6, соответственно, которые обеспечивают тепловую связь между стенкой контейнера, ступенями криокулера и гелием. Теплопередача между внешней поверхностью теплообменника и внутренней стенкой контейнера осуществляется за счет теплопроводности гелия в тонком зазоре. Тепловой экран 7 соединен механически со стенкой контейнера на уровне первой ступени криокулера; 8 – вакуумный корпус криостата. ^3He подается в контейнер через трубку 9, а откачивается через патрубок 10. Трубка 9 переходит в трубчатый теплообменник, состоящий из нескольких последовательно соединенных секций 11–14. Теплообменник 14 оканчивается дросселем 15, обеспечивающим необходимое давление конденсации ^3He . Жидкий ^3He скапливается в испарителе 16, который соединен с контейнером посредством тонкостенной трубки 17 из нержавеющей стали диаметром 12 мм и длиной 60 мм. Между секциями теплообменников установлен насос с активированным углем 18, который поглощает примеси, находящиеся в ^3He . Пары гелия ^3He из испарителя поступают в контейнер и затем откачиваются через патрубок 10. Важным элементом рефрижератора является тепловой экран 19, который принимает температуру, близкую к температуре второй ступени холодной головки, и минимизирует теплоприток к испарителю.

Температуру измеряли датчиками – кремниевыми диодами T1, T2, T3 и терморезистором T4. Датчик температуры T1 расположен на второй ступени холодной головки; датчик T2 расположен на 4 см выше теплообменника 6, датчик T3 расположен внизу теплового экрана 7, датчик T4 установлен снаружи испарителя ^3He . Датчик T2 находился внутри колбы из теплоизоляционного материала. Тепловую связь этого датчика с гелием осуществляли по медному теплопроводу, который выводился из колбы и имел поверхность теплообмена с гелием около 2 мм². Предполагалось, что при работе с ^4He по его показаниям можно регистрировать появление уровня жидкого гелия.

На рис. 2 представлено фото системы теплообменников, на рис. 3 – фото низкотемпературной части рефрижератора. На рис. 2, 3 нумерация элементов совпадает с нумерацией на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты с ^4He

Для проверки работоспособности криокулера, заключенного в контейнер, первоначально были проведены эксперименты, в которых использовался ^4He . Было сжижено 100 л ^4He , при этом произошло охлаждение до 2.3 К без использования откачки. Эта температура соответствует паспорт-

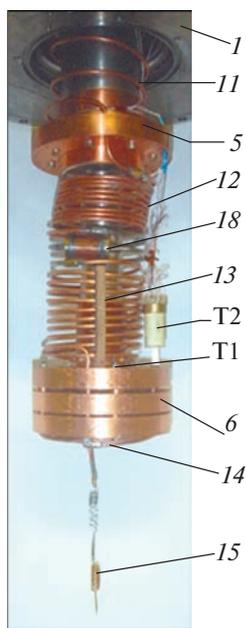


Рис. 2. Система теплообменников рефрижератора. Обозначения как на рис. 1.

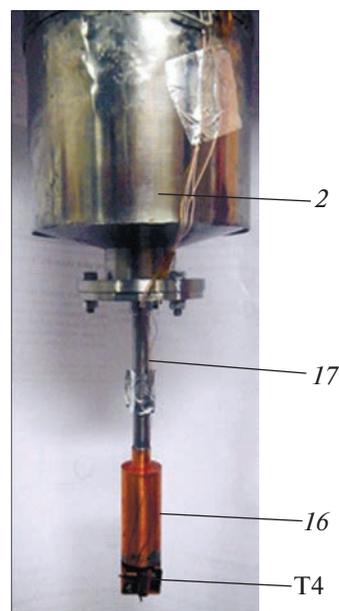


Рис. 3. Низкотемпературная часть рефрижератора. Обозначения как на рис. 1.

ной финальной температуре криокулера, если бы он эксплуатировался в вакуумном криостате. Для удержания температуры второй ступени 4.2 К потребовалась мощность 1.6 Вт, что немного больше ожидаемой паспортной мощности 1.5 Вт.

Эксперименты с ^3He

После включения криокулера ^3He в количестве около 20 л поступал в контейнер рефрижератора через патрубков 10 (рис. 1). Далее охлаждение проводили в два этапа. На первом этапе длительностью 25 ч циркуляция ^3He через теплообменники не осуществлялась. На втором этапе включали герметичный спиральный вакуумный насос производительностью 35 м³/ч. ^3He откачивался через патрубков 10 и возвращался обратно через трубку 9 в систему теплообменников и дроссель, после чего выходил в испаритель. Всего для охлаждения испарителя до температуры 2.3 К потребовалось 36 ч. Процесс охлаждения отображен на рис. 4.

По достижении этой температуры происходило сжижение ^3He , и температура испарителя становилась ниже 1 К. В итоге температура испарителя достигала 0.78 К и могла держаться сколько угодно длительное время при постоянной конденсации ^3He . Так осуществляется непрерывный режим работы рефрижератора (рис. 5). Температура 0.78 К определяется проводимостью патрубков 10 (рис. 1), который имеет диаметр 16 мм и длину 100 мм, а также скоростью откачки используемого насоса.

В разовом режиме работы рефрижератора, в котором ^3He в систему теплообменников не подается, температура испарителя понижается до 0.52 К. На рис. 6 показана временная зависимость температуры испарителя при переходе от непрерывного режима к разовому и обратно. Переход осуществлялся путем открытия–закрытия вентиля подачи ^3He в теплообменники. При этом температура испарителя изменялась от 0.78 до 0.52 К.

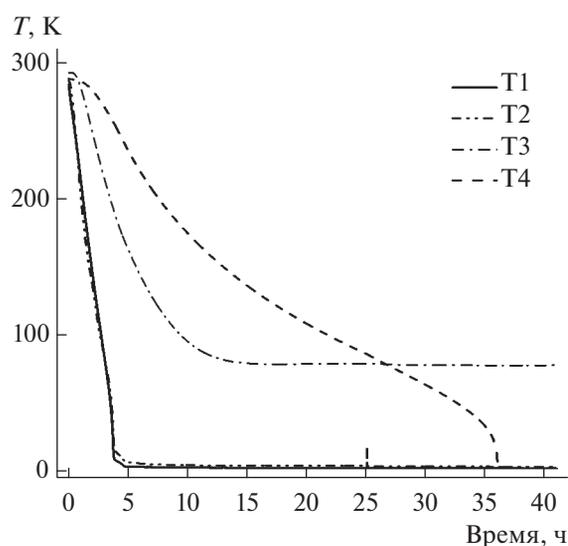


Рис. 4. Процесс охлаждения рефрижератора – графики изменения температуры датчиков T1–T4 во времени.

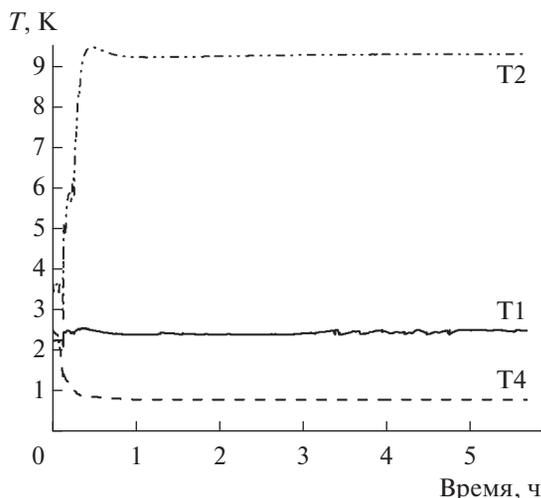


Рис. 5. Непрерывный режим работы рефрижератора – графики изменения температуры датчиков T1, T2, T4 во времени.

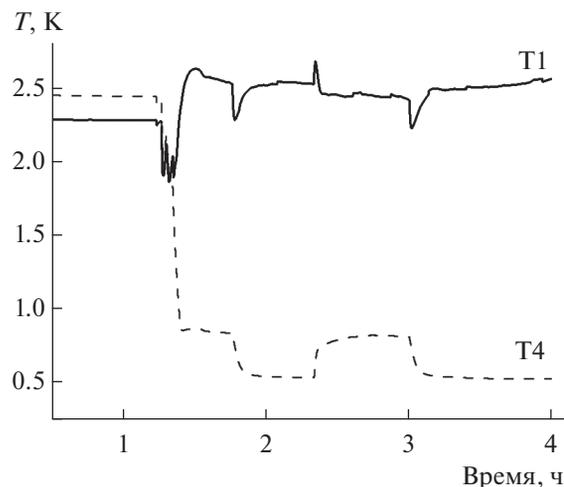


Рис. 6. Переход от непрерывного режима к разовому и обратно – графики изменения температуры датчиков T1, T4 во времени.

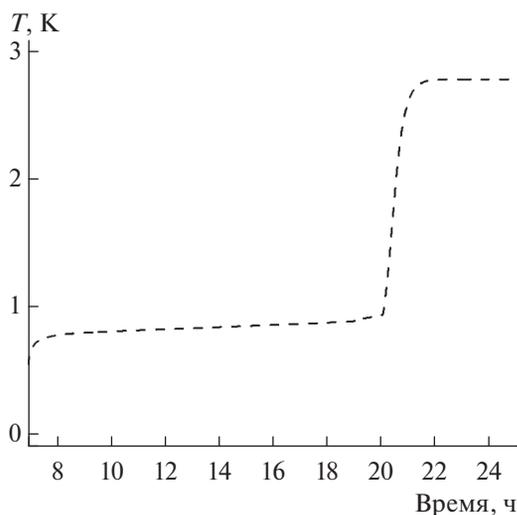


Рис. 7. Режим релаксации – график изменения температуры датчика T4 во времени. Температура испарителя медленно возрастает от 0.85 до 1 К в интервале от 8 до 20 ч.

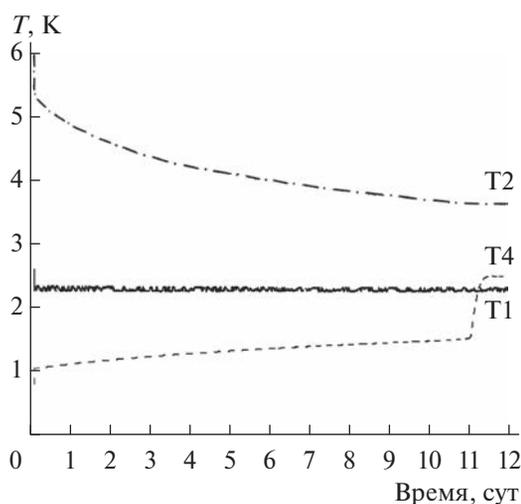


Рис. 8. Режим релаксации – графики изменения температуры датчиков T1, T2, T4 во времени. Температура испарителя медленно возрастает от 1.05 до 1.5 К в течение 11 суток.

Режимы релаксации

На следующем этапе изучали режимы работы рефрижератора с нулевой скоростью внешней откачки ^3He при предварительно заполненном жидким ^3He испарителе. Эти режимы можно назвать режимами релаксации. Отметим, что в этих режимах криокулер не останавливается.

Была исследована временная зависимость температуры испарителя после отключения спирального насоса откачки ^3He . В этом случае ^3He испарялся в контейнер, который выполнял роль насоса. Если после осуществления разового ре-

жима и достижения 0.52 К внешней откачке отключали, то температура испарителя достаточно быстро достигала 0.85 К и затем медленно возрастала до 1 К (рис. 7). Далее происходило полное осушение испарителя, его температура быстро возрастала до 2.7 К и стабилизировалась. Аналогично, если прекращался непрерывный режим при 0.78 К и останавливалась внешняя откачка и конденсация, то температура испарителя достаточно быстро достигала 1.05 К и затем возрастала до температуры 1.53 К в течение 11 суток до осушения испарителя (рис. 8). Далее, как и в первом

случае, происходил резкий скачок температуры до 2.5 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время представленный криостат используется для криогенной очистки ^3He от примесей. Процесс очистки и заправки детектора проводится в несколько этапов. Газовая смесь скачивается из детектора в баллон низкого давления (менее 1 бар). Затем смесь перекачивается в другой баллон через активированный уголь, охлажденный при помощи жидкого азота. Следующий этап очистки обеспечивает представленный в работе криостат. Однако для наполнения детектора необходимо давление не менее 7 бар. Для этого полученный чистый ^3He сжимается сорбционным насосом, охлажденным до 3.8 К криокулером замкнутого цикла, который расположен в другом криостате. Сорбционный насос представляет собой камеру объемом 200 см³ с высокопрочными стенками, 25% которой заполнены активированным углем. При температуре 3.8 К насос поглощает 25 л ^3He , который после нагрева до комнатной температуры создает давление 125 бар. Количество ^3He , полученного таким образом, обеспечивают заправку любого детектора, эксплуатируемого в ЛНФ. Отметим, что сорбционные насосы с охлаждением криокулером разработаны автором ранее и представлены, например, в [7–9].

Криостат может быть использован для физических исследований в области физики твердого тела. В этом случае образец устанавливается снаружи в нижней части испарителя. В дальнейшем подобная конструкция будет использована в качестве источника жидкого ^4He , жидкого или охлажденного ^3He , который внутри вакуумного криостата может питать другие устройства, например, рефрижераторы растворения ^3He в ^4He [10]. Эта конструкция может быть прогреваемой системой, в этом случае в режиме релаксации ее можно использовать в качестве охладителя туннельного сканирующего микроскопа на температурном уровне 1 К наряду с установкой [11, 12], работающей при температуре 4.2 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г., внутренний номер 15. СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В. и др.* // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 5. С. 961. (Belushkin A.V., Bogdzel' A.A., Zhuravlev V.V. et al. Phys. Solid State. 2010. V. 52. P. 1025). <https://doi.org/10.1134/S1063783410050306>
2. *Белушкин А.В., Богдзель А.А., Буздавин А.П. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 5. С. 713. (Belushkin A.V., Bogdzel' A.A., Buzdavin A.P. et al. Phys. Particles Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 436). <https://doi.org/10.1134/S154747711305004X>
3. *Churakov A.V., Belushkin A.V., Bogdzel A.A. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1021. № 1. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1021/1/012021>
4. *Черников А.Н., Буздавин А.П., Журавлев В.В., Чол Р.К., Глазков В.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 11. С. 29. (Chernikov A.N., Buzdavin A.P., Zhuravlev V.V., Ryom Gwang Chol, Glazkov V.P. J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2010. V. 4. P. 898). <https://doi.org/10.1134/S1027451010060042>
5. *Chernikov A.N., Buzdavin A.P.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 112. <https://doi.org/10.1134/S1547477119020031>
6. *Chernikov A.N., Dobrin I., Kovalenko N., Kulikov S.A., Culicov O., Popovichi I., Enache D., Dobrin A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1021 № 1. P. 012048 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1021/1/012048>
7. *Черников А.Н., Трофимов В.Н.* // Приборы и техника эксперимента. 2003. Т. 46. № 4. С. 157. (Trofimov V.N., Chernikov A.N. Instruments and Experimental Techniques. 2003. V.46. № 4. С. 576). <https://doi.org/10.1023/A:1025119107332>
8. *Vystavkin A.N., Shitov S.V., Bankov S.E. et al.* // Radiophys. Quantum Electronics. 2007. V. 50. № 10. P. 852. <https://doi.org/10.1007/s11141-007-0077-x>
9. *Черников А.Н., Трофимов В.Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 9. С. 108. (Chernikov A.N., Trofimov V.N. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. V. 8. P. 956). <https://doi.org/10.1134/S1027451014040028>
10. *Лоунасмаа О.В.* Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир, 1977. 356 с. (Lounasmaa O.V. Experimental Principles and Methods Below 1 K, Academic Press, London. 1974),
11. Патент № 62691 (РФ). Система охлаждения сканирующего сверхвысоковакуумного туннельного микроскопа / ОИЯИ. Трофимов В.Н., Черников А.Н., Зайцев-Зотов С.В. // Приоритет от 12.06.2006.
12. *Трофимов В.Н., Черников А.Н., Зайцев-Зотов С.В., Дюжиков И.Н., Шевлюга В.М., Ельцов К.Н.* // Приборы и техника эксперимента. 2007. Т. 50. № 6. С. 128. (Trofimov V.N., Chernikov A.N., Zaitsev-Zotov S.V., Dyuzhikov I.N., Shevlyuga V.M., Eltsov K.N. // Instruments and Experimental Techniques. 2007. V. 50. № 6. С. 838). <https://doi.org/10.1134/S002044120706022X>

^3He Refrigerator Based on Closed Cycle Cryocooler Cooling

A. N. Chernikov^{1, *}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, 141980 Russia

**e-mail: chern@nf.jinr.ru*

In the Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research, work is underway to create gaseous neutron detectors. To prepare a working mixture of gases, it is necessary to use pure ^3He , which is obtained by freezing impurities. The ^3He refrigerator was created for this purpose. The refrigerator can also be used to obtain low temperatures in a physics experiment. In this work, the operating modes of the refrigerator are studied. In the continuous mode of ^3He circulation, a temperature of 0.78 K was obtained. When ^3He vapor is pumped out by an external pump in a single cooling mode, a temperature of 0.52 K is reached. We also study relaxation modes in which, with pre-condensed ^3He , the volume of the container plays the role of a pump. A regime is presented in which the temperature of the evaporator relaxes from 1 to 1.5 K within 11 days.

Keywords: ultralow temperatures, helium-3, cryocoolers, activated carbon pump.