

## <sup>3</sup>He-КРИОСТАТ-ВСТАВКА В РЕФРИЖЕРАТОР С ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБОЙ

© 2009 г. **Ф. Herrmann\***, **Р. Herrmann\***, **В. С. Эдельман**

*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН*

*Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2*

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

*\*Institut für angewandte Photonik e.V., Berlin, BRD*

Поступила в редакцию 15.04.2009 г.

Описан компактный и автономный <sup>3</sup>He-криостат-вставка в двухступенчатый рефрижератор с импульсной трубой. Криостат содержит ванны <sup>4</sup>He и <sup>3</sup>He, откачиваемые криосорберами до температур ~1 К и ~0.35 К соответственно. Время поддержания низкой температуры 6–8 ч при количестве заправленного <sup>3</sup>He ~0.035 моль. Габариты вставки (ниже верхнего фланца): диаметр 49 мм, длина 720 мм. Вставка вводится в герметичную трубу-колодец, заполняемую при работе теплообменным газом, способствующим отводу тепла на уровни 45–50 К (первая ступень импульсной трубы) и 3–4 К (вторая ступень импульсной трубы). Установка и извлечение криостата может осуществляться как на теплом рефрижераторе, так и при его охлаждении до низких температур.

PACS: 07.20.Mc

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для получения низких температур становится популярным применение так называемых “сухих” лабораторных рефрижераторов с импульсной трубой (р.и.т.), позволяющих отказаться от использования в больших количествах дорогого жидкого гелия. В современных р.и.т. достигаются температуры ~2.5 К и ниже, что дает возможность встраивать в них криоблоки с <sup>3</sup>He с сорбционной откачкой. На интернет-сайтах ведущих фирм, производящих криогенное оборудование, можно найти описание таких интегрированных конструкций.

Однако в ряде случаев возникает потребность оперативной смены образцов без остановки работы р.и.т., для чего образец и блоки охлаждения необходимо разместить в съемной вставке. Это может быть существенно, например, при проведении экспериментов в сильном магнитном поле сверхпроводящего соленоида. Размещение в р.и.т. массивного соленоида приводит к увеличению до многих часов времени достижения низких температур и отогрева до комнатной температуры. Опыт использования вставки с охлаждением образцов до температуры р.и.т. описан в [1].

Ниже описана вставка с криосорбционной откачкой <sup>3</sup>He, работающая с двухступенчатым р.и.т. производства фирмы TransMIT, Giessen, BRD, укомплектованным производителем герметичным колодцем для размещения вставки и сверхпроводящим соленоидом. Из-за теплопритока по тоководам минимальная температура р.и.т. увеличивается до 3.5–4 К. При такой температуре

наличие только блока с <sup>3</sup>He не очень эффективно, и рационально дополнить вставку криосорбционной системой с <sup>4</sup>He.

### КОНСТРУКЦИЯ <sup>3</sup>He-КРИОСТАТА

При разработке прибора использован опыт, накопленный при изготовлении микрорефрижераторов растворения, вставляемых в транспортный сосуд с жидким гелием [2, 3]. Поскольку описание принципиальной конструкции основных узлов можно найти в этих работах, здесь мы ограничимся приведением упрощенной схемы прибора (рис. 1). Сорберы <sup>4</sup>He и <sup>3</sup>He – цилиндры из нержавеющей стали, заполненные активированным углем, – размещены в герметичных медных стаканах 9, 10, не касаясь их стенок. Стаканы представляют собой часть блока с медным дном, закрывающим сверху герметичный объем внутри чехла 16 с разъемным конусным уплотнением.

На сорберы намотаны нагреватели из провода ПЭШОК 0.1 и установлены термодпары медь–константан для контроля температуры. Тонкостенными трубками из нержавеющей стали с медными проставками (на рис. 1 не показаны) в области медного блока один сорбер соединен с ванной <sup>4</sup>He 14, а другой – с ампулой конденсации <sup>3</sup>He 13 и с ванной <sup>3</sup>He 15. Нижняя часть трубки, ведущей к ванне <sup>4</sup>He, сужена до диаметра ~1 мм для ограничения переноса по сверхтекучей пленке. Трубки связаны между собой теплопроводами 17 для

охлаждения газообразного  $^3\text{He}$  потоком испаряющегося  $^4\text{He}$ .

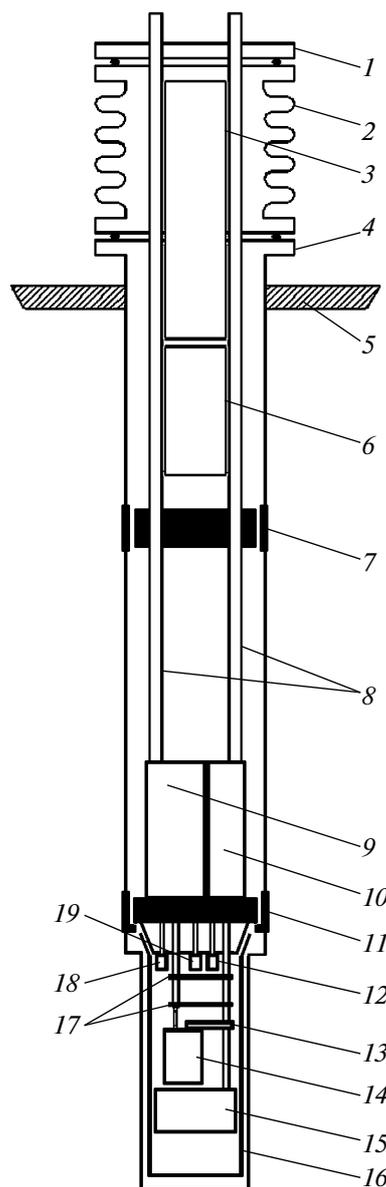
Микросорберы 12, 18 (медные ампулы с активированным углем, снабженные нагревателями, на тонкостенных трубках из нержавеющей стали) управляют давлением газа в стаканах сорберов: при их нагреве в объеме между соответствующим сорбером и стаканом появляется газ и устанавливается эффективный теплообмен. При охлаждении до температуры медного блока в объеме стакана устанавливается глубокий вакуум. Аналогичный микросорбер 19 открыт в герметичный объем внутри чехла 16. Вакуумная плотность внутри чехла обеспечивается притертыми конусами, смазанными апьезоном. После сборки этот объем заполняется небольшим количеством гелия, откачиваемого микросорбером 19 в процессе охлаждения низкотемпературных узлов.

Вся конструкция висит на четырех тонкостенных трубках из нержавеющей стали, внутри которых проходят провода и капилляры напуска газов. Одна из них используется для откачки объема, ограниченного чехлом 16. Трубки проходят через верхний фланец 1. Между ними расположены балластные объемы 3, 6, в которых под давлением ~25 атм хранятся газы при нагреве вставки до комнатной температуры.

Вставка имеет следующие габариты: диаметр 49 мм, высота (до фланца 1) 720 мм. Она вставляется в герметичную трубу с фланцем 4, укрепленную в верхнем фланце 5 р.и.т. Труба снабжена медными кольцами 7 и 11, связанными с первой и второй ступенями р.и.т. Температуры колец в рабочем режиме 45–50 К (кольцо 7) и 3.5–5 К (кольцо 11). Между медными кольцами трубы и соответствующими элементами вставки установлены центрирующие разрезные пружинные бронзовые кольца — два сверху и одно внизу. Верхние кольца определяют теплообмен в зоне 45 К. Между фланцами установлен сильфон 2. Благодаря ему блок сорберов прижимается к кольцу 11 при снижении давления в трубе ниже атмосферного.

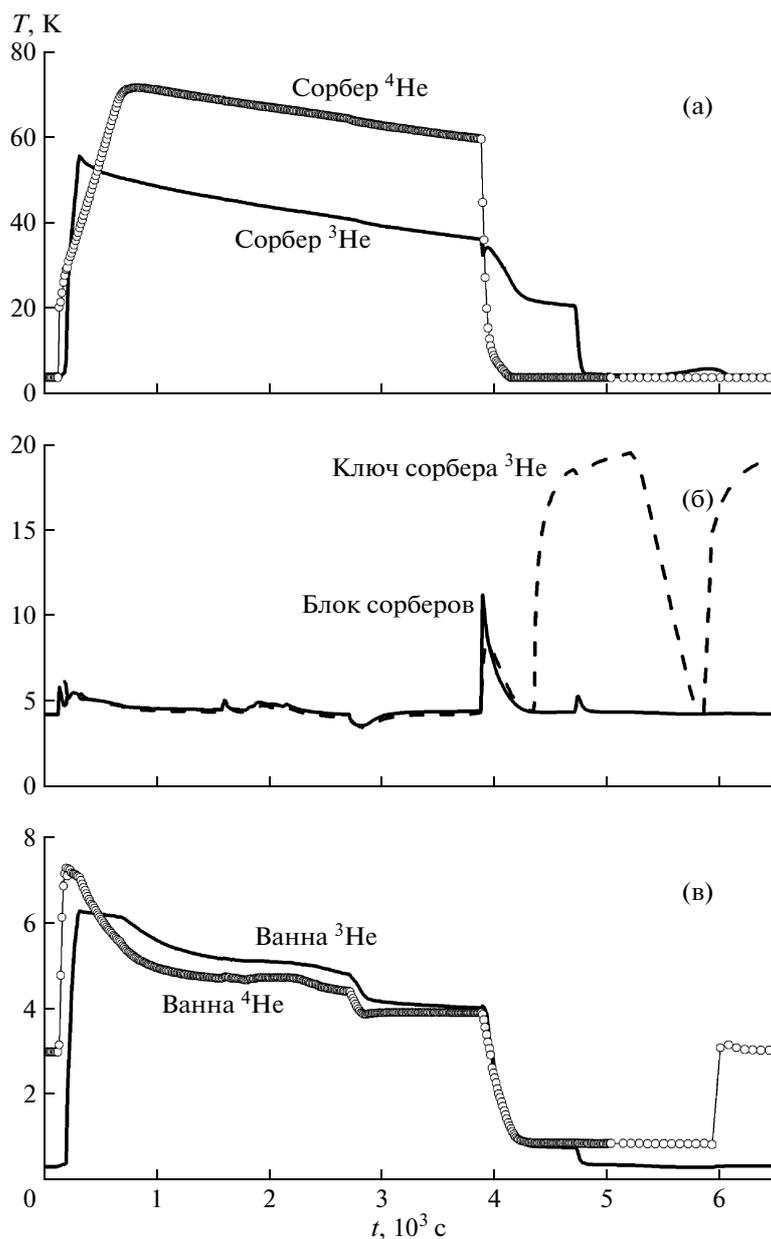
## РАБОТА КРИОСТАТА

Охлаждение р.и.т. и деталей вставки до температуры ~4 К достигается за 8–10 ч. Для охлаждения вставки в трубу-колодец напускается гелий до давления порядка атмосферного при теплом приборе. Если внутри вставки отсутствуют газы, происходит их заправка благодаря сорбции в холодных сорберах. Количество заправленных газов: 0.8–1 л  $^3\text{He}$  и 1.5–2 л  $^4\text{He}$ . Затем включается нагрев сорберов. Мощность нагрева ~0.5–1 Вт. По достижении сорберами температур, гарантирующих практически полную десорбцию газов, нагрев выключается, и сорберы медленно охлаждаются за счет потока тепла по трубкам из не-



**Рис. 1.** Упрощенная схема вставки. 1, 4 – фланцы; 2 – сильфон; 3, 6 – балластные емкости для хранения  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  соответственно; 5 – верхний фланец р.и.т.; 7 – зона контакта с первой ступенью р.и.т.,  $T \approx 45$  К; 8 – трубки, на которых подвешена нижняя часть вставки; 9, 10 – стаканы, в которых установлены сорберы; 11 – зона контакта со второй ступенью р.и.т.,  $T \approx 3.5$ –5 К; 12, 18, 19 – микросорберы ключей сорберов  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  и теплообменного газа; 13 – медная ампула конденсации  $^3\text{He}$ ; 14 – ванна  $^4\text{He}$ ; 15 – ванна  $^3\text{He}$ ; 16 – герметизирующий чехол с разъемным коническим уплотнением; 17 – медные переключатели.

ржавеющей стали между сорберами и медным блоком. При нагреве сорберов из-за появления потока нагретых газов растет температура медного блока с сорберами, тепловых ключей и ванн  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  (рис. 2б, 2в). Однако этот нагрев незначителен, и через ~40 мин после начала нагрева



**Рис. 2.** Зависимости от времени: **а** — температуры сорберов; **б** — медного блока, в котором размещены сорберы, и ключа сорбера <sup>3</sup>He; **в** — ванн <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He — в ходе проведения десорбции, конденсации газов и охлаждения откачкой паров.

ванны <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He остывают до 4 К, и происходит конденсация <sup>4</sup>He. После этого последовательно включается нагрев ключей сорберов <sup>4</sup>He и <sup>3</sup>He (мощность нагрева несколько милливатт).

При срабатывании ключей температура сорберов резко уменьшается (рис. 2а). Ванны остывают до ~1 К, и происходит конденсация <sup>3</sup>He. Затем, после остывания сорбера <sup>3</sup>He, начинается его откачка, и температура ванны <sup>3</sup>He снижается до ~0.35–0.4 К (рис. 2в). Отметим, что при быстром охлаждении сорбера <sup>4</sup>He температура медного блока скачком поднимается выше 10 К, а темпе-

ратура ключа сорбера <sup>3</sup>He — до 8 К. К счастью, такого нагрева недостаточно для преждевременного срабатывания этого ключа. Как видно из рис. 2б, его срабатывание происходит при температуре 18 К.

Любопытно поведение температуры медного блока (и ключа) в интервале времени 2700–3000 с — после резкого спада до 3.6 К она возвращается к уровню 4.5 К. По-видимому, это связано с особенностями теплообмена между кольцом II, находящимся в хорошем контакте с р.и.т., и медным блоком. По мере монотонного снижения температуры р.и.т., которая всегда ниже температуры

медного блока, теплообменный гелий может сконденсироваться в этом зазоре, удерживаясь там за счет поверхностного натяжения. Из-за этого кратковременно возрастает теплообмен. Затем, при дальнейшем остывании р.и.т., жидкость переконденсируется из зазора в лежащие ниже участки трубы. При этом падение плотности газообразного гелия приводит к тому, что теплообмен, обусловленный конвекцией, снижается, и благодаря притоку тепла сверху по трубкам температура блока возрастает. Таким образом, снижение температуры р.и.т. существенно ниже 4 К отрицательно влияет на работу вставки.

Температура ванны  $^3\text{He}$  на уровне 0.38–0.4 К поддерживается в течение 8 ч (рис. 3). Надо полагать, что фактически она несколько ниже – при выключении нагрева ключа, несмотря на некоторый рост температуры сорбера  $^3\text{He}$  (рис. 2а) и снижение эффективности откачки, показания термометра снижаются до 0.34–0.35 К, что можно объяснить устранением перегрева термометра попадающим на него тепловым излучением нагретого ключа. Через 8 ч сорбер начинает насыщаться, и через 10 ч после начала откачки температура поднимается до 0.6 К. Жидкость в ванне  $^3\text{He}$  заканчивается. По запасу тепла испарения  $\sim 1$  Дж можно оценить, что теплоприток к ванне  $^3\text{He}$  составляет 25 мкВт.

Вставку можно извлекать из р.и.т. и вставлять в него при низких температурах. При этом надо следить, чтобы в трубу-колодец не попал воздух, для чего проводить эту процедуру можно только при температуре р.и.т.  $\geq 4.2$  К и при продувке через открытую трубу газообразного гелия, т.е. в условиях, имитирующих работу с сосудом с жидким гелием.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что описанная вставка вполне работоспособна. До ее испытания существовали опасения, что эффекты перегрева относительно р.и.т. могут приводить к заметному замедлению процессов при проведении десорбции, невозможности достижения достаточно низкой температуры, обеспечивающей эффективную конденсацию  $^4\text{He}$ , и нарушению работы в момент быстрого охлаждения сорберов. Оценки соответствующих тепловых потоков за счет теплопроводности газов не внушали особого

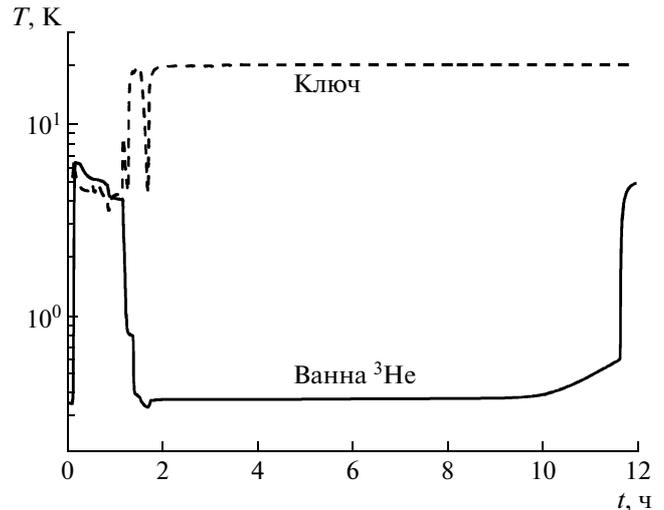


Рис. 3. Зависимость от времени температуры ванны  $^3\text{He}$  и ключа сорбера  $^3\text{He}$ .

оптимизма. Действительно, в первых опытах при относительно небольшом количестве теплообменного газа в трубе охлаждение ванн  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  шло значительно медленнее, чем в опыте, представленном на рис. 2, 3. Можно было надеяться на интенсификацию теплопереноса благодаря конвекции, и эксперимент подтвердил ожидания. Фактически время этапа конденсации газов имеет примерно ту же длительность, что и при работе с микрокриостатом растворения, погружаемым в сосуд с жидким гелием [2, 3]. Это означает, что такой микрокриостат может без изменения конструкции успешно работать и в “сухом” варианте при погружении в колодец р.и.т. при соответствующей подгонке размеров трубы-колодца.

Авторы признательны А.Ф. Андрееву и N. Langhoffу за интерес к работе и И.Н. Хлюстикову за участие в работе. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант 07-02-00515-а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://cryo.transmit.de>
2. Herrmann R., Офицеров А.В., Хлюстиков И.Н., Эдельман В.С.// ПТЭ. 2005. № 5. С. 142.
3. Эдельман В.С.// ПТЭ. 2009. № 2. С. 159.