

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



A-537

P8 - 9168



В.П.Алфименков, О.Н.Овчинников

5027/4-75

РЕФРИЖЕРАТОР С РАСТВОРЕНИЕМ ГЕЛИЯ-3

В ГЕЛИИ-4

ДЛЯ РАБОТЫ НА ПУЧКЕ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

1975

P8 - 9168

В.П.Алфименков, О.Н.Овчинников

РЕФРИЖЕРАТОР С РАСТВОРЕНИЕМ ГЕЛИЯ-3
В ГЕЛИИ-4
ДЛЯ РАБОТЫ НА ПУЧКЕ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Направлено в журнал "Физика низких температур"
и на 14 конференцию стран СЭВ по физике и технике
низких температур, Братислава, 20-25 октября 1975 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

I. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальной ядерной физике для поляризации атомных ядер статическими методами используется глубокое охлаждение образцов из исследуемого вещества в сильных магнитных полях. Для получения приемлемой в экспериментах статической поляризации ядер требуются температуры ~ 100 м К и ниже. Поскольку ядерно-физические эксперименты обычно очень продолжительны, в них для ядерной поляризации необходимо использовать стационарные методы глубокого охлаждения.

Единственным из известных в настоящее время методов глубокого охлаждения, удовлетворяющим таким требованиям, является метод с использованием непрерывного растворения ^3He в ^4He . При этом соответствующий рефрижератор с растворением ^3He в ^4He должен быть специально приспособлен для продолжительной работы без отогрева. Так как поляризация ядер обычно осуществляется в сильном внешнем магнитном поле, вибрации рефрижератора могут привести к нежелательным перегревам образца. Отсюда возникают повышенные требования к виброизоляции рефрижератора.

В случае работы с охлаждаемым образцом на пучке медленных нейтронов появляются еще два дополнительных требования, которым должен удовлетворять рефрижератор. Первое требование обусловлено тем, что в связи с сильным поглощением нейтронов ядрами атомов ^3He присутствие раствора в нейтронном пучке обычно является нежелательным. Это означает, что исследуемый образец нельзя погружать в раствор, а нужно охлаждать косвенно. Второе требование сводится к не-

обходимости дистанционно управлять рефрижератором и контролировать его работу, поскольку рефрижератор находится на нейтронном пучке, т.е. в зоне высокой радиации, и продолжительное пребывание обслуживающего персонала вблизи него является недопустимым.

Ниже описан рефрижератор с растворением ^3He в ^4He , созданный с учетом сформулированных выше требований в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ для работы на пучке нейтронов реактора ИБР-30.

II. КОНСТРУКЦИЯ РЕФРИЖЕРАТОРА

1. Принципиальная схема рефрижератора

Схема рефрижератора аналогична схеме установки Неганова /1/ и включает в себя низкотемпературную часть и насосную группу с вакуумными и газовыми коммуникациями.

Низкотемпературная часть состоит из узла растворения и ванн с жидким гелием /под вакуумной откачкой и под атмосферным давлением/ и азотом, заключенных в общий вакуумный кожух.

Предварительное охлаждение гелиевых ванн и узла растворения осуществляется последовательной продувкой жидкого азота и жидкого гелия через систему змеевиков, находящихся в тепловом контакте с гелиевыми ваннами и узлом растворения. По окончании продувки остатки жидкости и газ откачиваются из змеевиков форвакуумным насосом. Заполнение обеих гелиевых ванн независимое, причем конструкция заливочного устройства в ванне с $T = 1\text{ K}$ дает возможность осуществлять доливку гелием практически без влияния на нормальную работу узла растворения и позволяет удлинить время между необходимыми доливками за счет заполнения всего объема ванны гелием с $T = 1\text{ K}$. Контроль за количеством гелия в ваннах осуществляется поплавковыми уровнемерами.

Узел растворения, конструкция которого подробно будет рассмотрена ниже, изолирован от внешнего теплопритока негерметичными экранами с температурой

1 K , 4 K и 77 K , находящимися в тепловом контакте с соответствующими ваннами. Нижние части охлаждаемых экранов и вакуумного кожуха, находящиеся в нейтронном пучке, выполнены из алюминиевого сплава и имеют фланцевые разъемы, обеспечивающие удобство доступа к узлу растворения с образцом.

Непрерывная циркуляция ^3He в замкнутом цикле обеспечивается группой из трех последовательно включенных насосов. Выходящие из узла растворения пары ^3He откачиваются паромасляным бустерным насосом БН-3, к выходу которого подключен двухроторный вакуумный насос ДВН-50. Герметичный механический вакуумный насос НВГ-2, подключенный к выходу насоса ДВН-50, обеспечивает нормальную работу насосной группы при необходимом давлении в линии подачи ^3He в узел растворения. Прошедший насосную группу газ очищается от масляных паров и возможных примесей в гелии других газов последовательно включенными матерчатými фильтрами и азотной ловушкой, заполненной активированным углем и палладированным силикагелем.

Газообразный ^3He , поступающий в змеевиковую линию подачи низкотемпературной части рефрижератора, последовательно охлаждается до температур азотной и гелиевых ванн. Сконденсированный при температуре $\sim 1\text{ K}$ и давлении $\sim 10\text{ мм рт.ст.}$ жидкий ^3He поступает в узел растворения.

Для снижения уровня вибраций низкотемпературная часть рефрижератора установлена непосредственно на корпус тяжелого электромагнита, имеющего массивный виброизолированный фундамент. Газовые коммуникации, связывающие низкотемпературную часть с механическими насосами, установленными на отдельных фундаментах, изготовлены из гибких герметичных металлорукавов, снижающих уровень передаваемых вибраций. Гибкость этих коммуникаций позволяет также юстировать низкотемпературную часть рефрижератора с охлаждаемым образцом относительно магнита и нейтронного пучка как во время сборки, так и во время работы рефрижератора.

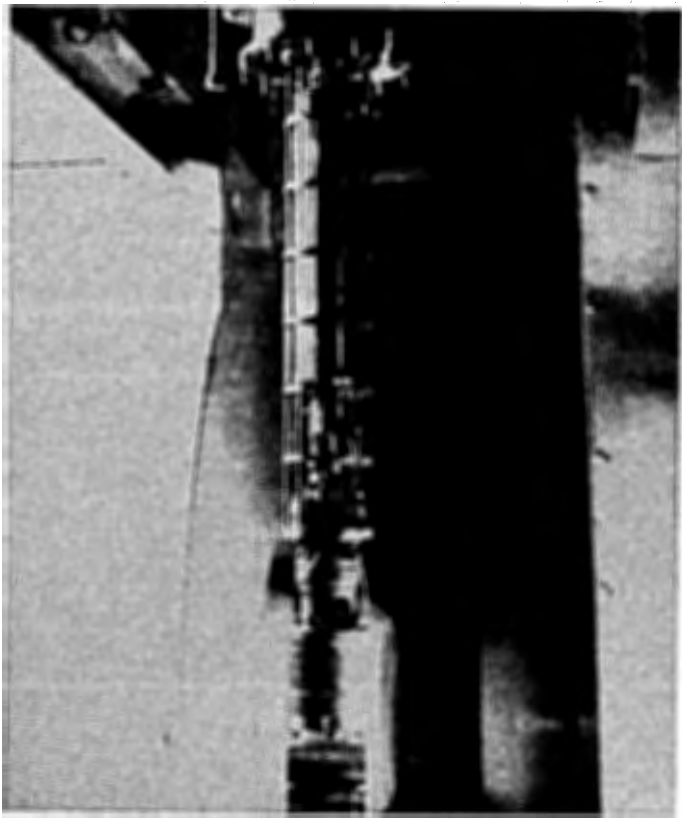


Рис. 2. Общий вид узла растворения.

Основной теплообменник и камера растворения с образцом помещены в съемный герметичный экран /11/, давление внутри которого контролируется по трубке /12/, выведенной в теплую зону. Во время предварительного охлаждения узла растворения от комнатной температуры до гелиевой путем продувки жидких азота и гелия через змеевик /13/, находящийся в контакте с камерой испарения, внутри экрана поддерживается давление ${}^4\text{He}$, достаточное для создания газовой тепло-связи между элементами узла растворения. В конце процесса предварительного охлаждения теплообменный газ поглощается активированным углем /14/, сорбцион-

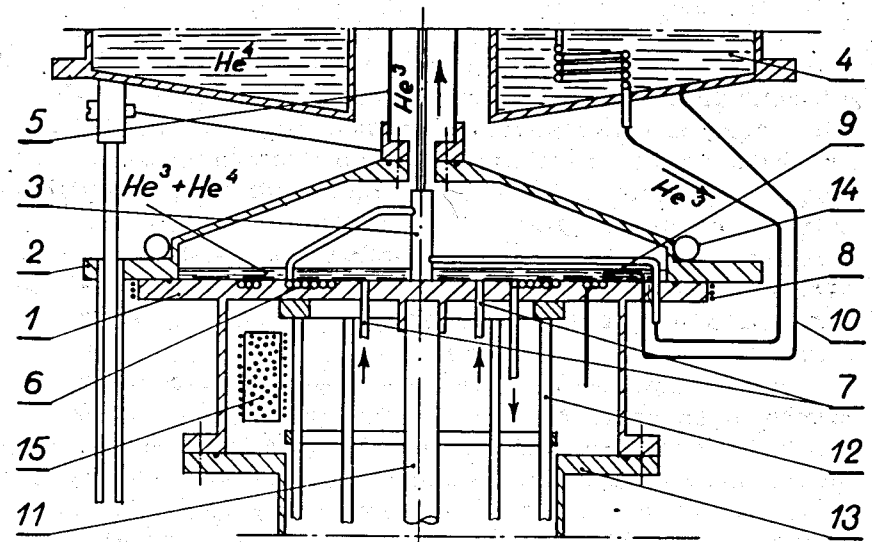


Рис. 3. Камера испарения. 1 - дно; 2 - крышка; 3 - дроссель; 4 - ванна 1° -ного гелия; 5 - линия откачки; 7 - шрубка подачи раствора на испарение; 8 - нагреватель; 6,9,14 - змеевики; 10 - капилляр, 11 - шрубка; 12 - ферма; 13 - экран; 15 - угольный адсорбер.

ная способность которого регулируется электрическим нагревателем. Дальнейшее охлаждение узла растворения осуществляется циркулирующей рабочей смеси ${}^3\text{He}$ с ${}^4\text{He}$, причем скорость циркуляции значительно повышается по сравнению с рабочей за счет уменьшения сопротивления регулируемого снаружи дросселя /1/.

Рассмотрим более подробно конструкцию отдельных элементов узла растворения, общий вид которого показан на рис. 2.

Камера испарения. Расположенный в верхней части узла растворения латунный корпус камеры испарения /рис. 3/ имеет плоское дно /1/ диаметром 150 мм, соединенное с крышкой /2/ на индиевом уплотнении. Игольчатый дроссельный вентиль /3/, создающий необходимое давление для конденсации ${}^3\text{He}$ в теплообменнике ванны 1° -ного гелия /4/, находится внутри камеры ис-

парения и имеет латунные корпус и иглу, привод которой выведен в теплую зону через линию откачки /5/. С выхода дроссельного вентиля жидкий ^3He поступает в теплообменник /6/ из медной трубки с внутренним диаметром 1 мм и длиной 1,7 м и затем в основной теплообменник. Обратный поток ^3He , диффундирующего в слабом растворе, из основного теплообменника поступает в камеру испарения по трубкам /7/, а необходимая температура камеры поддерживается проволочным нагревателем /8/.

На дне /1/ находится змеевик /9/ из медной трубки внутренним диаметром 1 мм и длиной 0,6 м, служащий тепловой развязкой капилляра /10/, соединяющего объем контейнера образца с ванной /4/. С дном /1/ жестко связаны тонкостенная нержавеющая трубка /11/ подвески основного теплообменника и специальная ферма /12/ из тонкостенных нержавеющих трубок и колец, на которой крепится камера растворения. К нижней части камеры испарения на герметичном индиевом уплотнении крепится медный экран /13/ с внутренним диаметром 78 мм и стенкой толщиной 1 мм. К крышке /2/ припаян медный змеевик /14/ системы предварительного охлаждения.

Ловушка /15/ для поглощения теплообменного газа представляет собой медную трубку диаметром 16 мм и длиной 80 мм с проволочным нагревателем снаружи трубки и активированным углем внутри.

Тонкостенная нержавеющая трубка диаметром 20 мм линии откачки /5/ присоединена к крышке /2/ на разъемном индиевом уплотнении и имеет диафрагму диаметром 8 мм. Система проволочных растяжек и распорок из тонкостенных нержавеющих трубок обеспечивает жесткость и центровку узла растворения относительно ванны /4/.

Основной теплообменник. Минимально достижимая температура в рефрижераторе растворения, работающем в непрерывном режиме, в значительной степени определяется эффективностью теплообмена между потоком ^3He , поступающим на растворение, и обратным потоком ^3He , диффундирующего в слабом растворе.

Существенными требованиями, предъявляемыми к теплообменнику, являются сосредоточение большой теп-

лообменной поверхности в единице длины, уменьшение теплового потока вдоль теплообменника и обеспечение минимального вязкостного нагрева при движении потоков.

Наибольшее распространение получили теплообменники ступенчатого, или секционного, типа, представляющие собой, например, набор последовательно соединенных теплоизолированных друг от друга блоков из пористой меди /2/. Как показано в работе /3/, выравнивание температуры в каждой секции такого теплообменника приводит к менее эффективному использованию поверхности теплообмена по сравнению с непрерывным теплообменником, т.е. таким, в котором теплопередача за счет теплопроводности в направлении движения потоков незначительна.

Мы использовали теплообменник непрерывного типа /рис. 4/, состоящий из двух последовательно соединенных секций. Конструкция первой секции /1/, работающей при более высокой температуре, аналогична описанной в работе /1/. Секция состоит из четырех тонкостенных трубок /2/ из нержавеющей стали диаметром около 22 мм и длиной 30 см, вставленных одна в другую и образующих три концентрические полости шириной по 0,1 мм. Чистый ^3He из теплообменника в камере испарения по трубке /3/ поступает в нижнюю часть средней полости, охлаждается и по трубке /4/ подается во вторую секцию теплообменника. Диффундирующий в растворе ^3He поступает параллельно по трубкам /5/ в верхние части крайних полостей, охлаждает ^3He , движущийся противоточно, и по трубкам /6/ проходит в камеру испарения. Расположение секции таким образом, что раствор с большей концентрацией ^3He находится сверху, устраняет возможность появления гравитационной неустойчивости в работе теплообменника. Суммарная площадь теплоконтакта первой секции теплообменника составляет около 400 см².

При достаточно низких температурах теплопередача в теплообменнике затруднена так называемым "скачком Капицы", т.е. тепловым сопротивлением границы жидкость-стенка теплообменника. Преодолеть это сопротивление можно за счет увеличения площади теплокон-

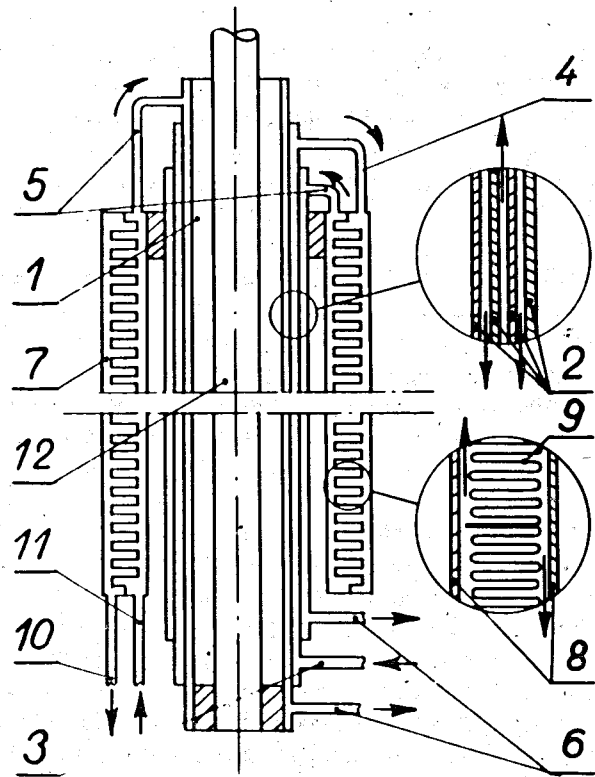


Рис. 4. Основной теплообменник. 1,7 - секции; 2,8 - коаксиальные трубки; 3,4,5,6,10,11 - соединительные трубки; 9 - сильфон; 12 - трубка подвески.

такта.. В работе /3/ указано, что одним из путей увеличения площади теплоконтакта единицы длины трубчатого теплообменника является замена гладкой теплопередающей трубы на сильно гофрированную. Такой теплообменник, несмотря на сравнительно большую площадь в сечении, перпендикулярном направлению потоков, работает как непрерывный, поскольку продольная теплопередача подавлена большим количеством включенных последовательно скачков Капицы. На этом принципе основана работающая при более низких температурах вторая секция теплообменника. Она выполнена в виде двухканаль-

ного коаксиального теплообменника /7/. Наружные трубки /8/ секции гладкие /из тонкостенных нержавеющей труб/, а средняя трубка - сильно гофрирована. Эта трубка представляет собой набор предварительно опресованных и герметично стыкованных между собой полutomпакowych сильфонов. Она изготовлена из двадцати пяти сильфонов с толщиной стенки 0,12 мм и расстоянием между стенками в гофрах около 0,1 мм. Зазоры между краями гофр и боковыми трубками /8/, определяющие шунтирующий поток тепла вдоль теплообменника и вязкостный нагрев при движении потоков, составляют около 0,5 мм в наружном и внутреннем каналах. Средние диаметры этих каналов 53 мм и 34 мм соответственно. При длине секции 25 см суммарная площадь поверхности теплообмена составляет около 1,3 м². ³He проходит по наружному каналу и по трубке /10/ поступает в камеру растворения. Обратный поток диффундирующего в растворе ³He идет из камеры растворения через трубку /11/ и внутренний канал секции.

Тонкостенные нержавеющей трубки, стыкующие секции между собой, а также с камерами испарения и растворения, имеют внутренние диаметры 1,4 мм и 3,4 мм для ³He и слабого раствора соответственно. Секции, для уменьшения габаритов теплообменника смонтированы коаксиально одна в другой, жестко соединены в верхней части и подвешены к камере испарения на нержавеющей трубке /12/.

Камера растворения. Конструкция камеры растворения с контейнером для охлаждаемого образца показана на рис. 5. Медный цилиндрический корпус камеры /1/ с внутренним диаметром 20 мм и длиной около 70 мм подвешен на ферме /2/ к камере испарения. Чистый ³He из основного теплообменника подается по трубке /3/ в верхнюю часть корпуса, растворяется в слабом растворе с понижением температуры и поступает в теплообменник /4/ для охлаждения ⁴He, находящегося в контейнере /5/ с исследуемым образцом /6/.

Корпус /1/ перегрет относительно слабого раствора за счет влияния более теплого чистого ³He, поступающего на растворение. Для ограничения нежелательного потока

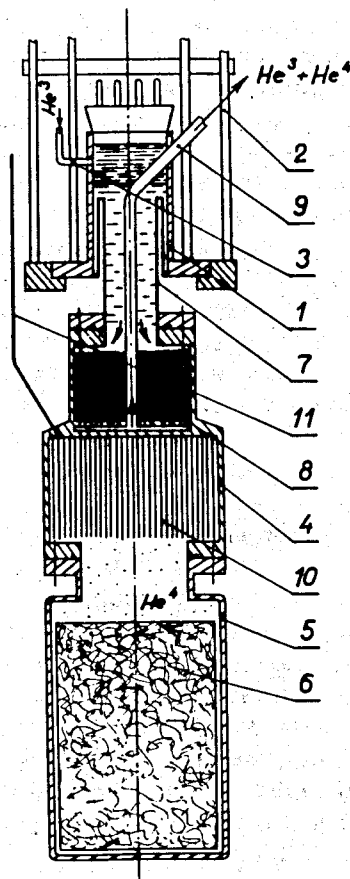


Рис. 5. Камера растворения. 1 - корпус; 2 - ферма; 3, 9 - соединительные фланги; 4, 8, 10 - теплообменник; 5 - контейнер; 6 - образец; 7 - тепловой мост; 11 - капилляр.

тепла по стенкам корпуса к теплообменнику /4/ между ними установлен тепловой мост /7/, находящийся ниже границы расслоения /в слабом растворе/. Мост изготовлен из двух тонкостенных нержавеющей трубок с диаметром около 20 мм и общей длиной 100 мм, вставленных коаксиально одна в другую.

Теплообменник, обеспечивающий косвенное охлаждение образца, по сути дела, представляет собой герметичную медную перегородку между раствором и ${}^4\text{He}$,

обладающую развитой поверхностью с обеих сторон. Площадь контакта с жидкостью увеличена за счет большого количества приваренных к перегородке медных проводов диаметром 0,12 мм и составляет около $0,6 \text{ м}^2$ как в верхней, так и в нижней ее части.

Рабочая часть теплообменника со стороны раствора /8/ имеет длину 30 мм, диаметр 40 мм и объемный коэффициент заполнения медными проводами, равный 0,5. Эффективность теплообмена в этой части теплообменника улучшена за счет омывания медной "щеткой" диффундирующим сквозь нее потоком ${}^3\text{He}$, проходящим сверху вниз с выходом по трубке /9/ в основной теплообменник.

Рабочая часть теплообменника /10/ со стороны ${}^4\text{He}$ в контейнере имеет длину 50 мм и диаметр 64 мм. Коэффициент заполнения объема медными проводами здесь уменьшен до 0,1 для улучшения условий теплопередачи в жидком ${}^4\text{He}$.

Исследуемые образцы /6/ в виде металлического слитка, пластин или порошка помещаются в алюминиевый контейнер /5/, размеры которого выбираются исходя из условий конкретного физического эксперимента и ограничены размерами экрана камеры испарения.

Разъемные соединения теплообменника /4/ с корпусом /1/ и контейнером /5/ выполнены на индиевых уплотнениях. Капилляр /11/, служащий для заполнения объема контейнера ${}^4\text{He}$, изготовлен из нержавеющей трубки с внутренним диаметром 0,5 мм и имеет длину около 70 см до тепловой развязки на камере испарения. Корпуса камеры растворения и теплообменника имеют герметичные вводы для проводов, идущих в объем раствора и ${}^4\text{He}$. Эти провода используются для подключения термометров и нагревателей. В жидком ${}^4\text{He}$ внутри контейнера помещен электронагреватель, предназначенный для повышения температуры образца.

3. Контроль за работой рефрижератора и управление им

Устройства контроля за работой газовых коммуникаций и управления ими /манометры, расходомеры, вен-

тили и т.п./, необходимые для предварительного охлаждения, заливки и запуска рефрижератора, расположены на пульте управления, смонтированном непосредственно на низкотемпературной части рефрижератора. Системы контроля температуры и вакуума в различных узлах рефрижератора, а также системы управления нагревателями камеры испарения и контейнера с образцом собраны в специальной стойке, расположенной вблизи низкотемпературной части.

Измерения температур ниже 1 К в различных точках узла растворения осуществляются с помощью угольных сопротивлений ИФП АН СССР^{4/} прокалиброванных по магнитному термометру с церий-магниевым нитратом. 5-канальная автоматическая самопишущая система измерения сопротивлений работает на переменном токе с частотой 25 Гц. Эта система позволяет измерить с точностью не хуже 10% сопротивления от 10^2 до 10^6 Ом при падении напряжения на термометре не более $5 \cdot 10^{-4}$ В.

Для защиты газовых коммуникаций и насосов тракта циркуляции ^3He от перегрузки имеются системы автоматического отключения насосов ДВН-50 и НВГ-2 при превышении давлением на их выходе определенных значений.

Кроме местных систем управления рефрижератором и контроля за ним, имеется дистанционный пульт, вынесенный из помещения с повышенной радиацией, где расположен рефрижератор, в измерительный центр /на расстоянии ~1 км от рефрижератора/. На этот пульт выведены приборы контроля состояния блокирующих систем, вакуума в ответственных узлах рефрижератора и количества испаренного из рефрижератора ^4He . На пульте имеются также самопишущее устройство, дублирующее показания многоканального измерителя угольных сопротивлений, и дублирующие системы управления нагревателями камеры испарения и контейнера с образцом.

III. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕФРИЖЕРАТОРА

Количество газообразных ^3He и ^4He , находящихся в замкнутом цикле непрерывного растворения, состав-

ляют соответственно 70 и 130 литров. При максимальной скорости циркуляции ^3He $Z = 2,4 \cdot 10^{-4}$ моль/с, определяемой производительностью насосной группы, предельно низкая температура раствора в камере растворения достигает ≈ 16 мК, а холодопроизводительность рефрижератора при 0,1 К в растворе составляет $1,5 \cdot 10^3$ эрг/с.

На рис. 6 представлены зависимости температуры камеры растворения и контейнера с образцом от тепловой нагрузки, характеризующие холодопроизводительность рефрижератора и тепловую связь между

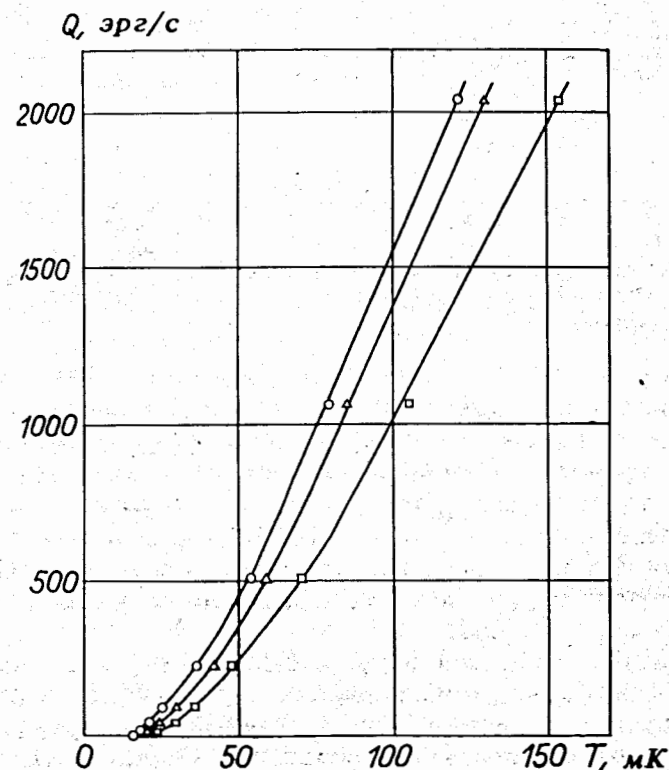


Рис. 6. Зависимость температур камеры растворения и контейнера с образцом от тепловой нагрузки со стороны образца при скорости циркуляции ^3He $Z = 2,4 \cdot 10^{-4}$ моль/с, о - раствор, Δ - поверхность теплообменника между раствором и контейнером, □ - ^4He в контейнере.

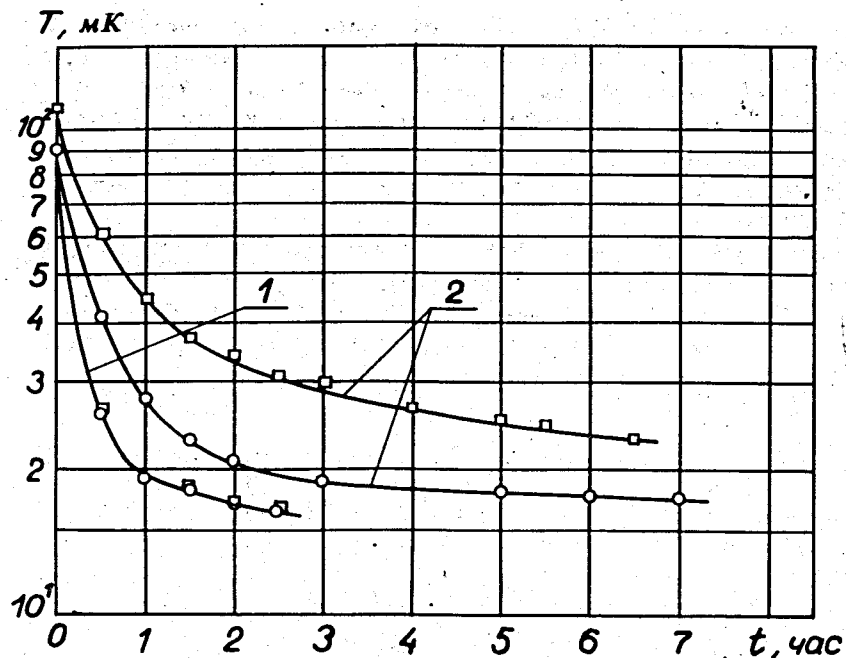


Рис. 7. Скорость охлаждения при $Z = 2,4 \cdot 10^{-4}$ моль/с. 1 - без образца, 2 - с образцом ^{18}O ; \circ - раствор, \square - ^4He в контейнере.

раствором и ^4He в контейнере образца. Выбранный нами вариант теплосвязи между стенкой камеры растворения и образцом, очевидно, не является оптимальным с точки зрения теплопередачи в связи с недостаточно высокой теплопроводностью ^4He и большими теплосопротивлениями на границах стенка - ^4He и ^4He - образец. Этот вариант, однако, обладает такими несомненными достоинствами, как универсальность и простота в изготовлении образцов.

В процессе работы с рефрижератором часто возникает необходимость в чередующихся небольших отогревах и охлаждениях образца. С этой точки зрения представляет интерес скорость охлаждения системы после небольшого отогрева. В связи с ограниченными холодопроизводительностью рефрижератора и теплосвязью раствор-образец эта скорость, естественно, уменьшается с увеличением теплоемкости образца. Для иллюстрации такого процесса на рис. 7 приведены зависимости тем-

пературы раствора и ^4He в контейнере от времени после отогрева системы до $0,1 \text{ K}$.

Все приведенные выше температурные характеристики относятся к случаю, когда узел растворения не находится в магнитном поле. Наложение магнитного поля может привести к перегреву узла растворения как за счет нестабильностей поля, так и за счет вибраций системы в поле. Предварительные измерения температуры угольными термометрами в случае с полем 15 кЭ от стандартного электромагнита указывают на наличие перегрева в несколько сотых K , однако имеются указания на то, что значительная часть перегрева - кажущаяся и связана с чувствительностью термометрической системы к магнитному полю. Подробное исследование этого явления пока не проведено.

Время охлаждения рефрижератора от комнатной до предельно низкой температуры составляет около суток. При непрерывной работе и газовом расходе гелия из 4° -ной ванны 230 л/час и 1° -ной ванны 20 л/час цикличность доливок в соответствующие ванны составляет 1 и 10 сумок.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный рефрижератор работает на нейтронном пучке уже в течение нескольких лет. Циклы его работы - продолжительные /до месяца непрерывной работы/, эксплуатационные характеристики вполне удовлетворительные. На рефрижераторе проведены измерения магнитных моментов компаунд-состояний ряда ядер редкоземельных атомов $^{5-7}$, а также начаты измерения спиновой зависимости взаимодействия нейтронов с ядрами атомов ^{18}O .

Авторы благодарят всех сотрудников лаборатории, принимавших участие в создании рефрижератора, в особенности А.В.Андросова, Б.И.Аполлонова, А.Г.Пименова, Б.А.Родионова, а также Б.С.Неганова за полезные обсуждения и интерес к работе.

Литература

1. Б.С.Неганов и др. ЖЭТФ, 50, 1445 /1966/.
2. J.C.Wheatly et al. Physics, 4, 1 (1968).
3. Б.С.Неганов. Препринт ОИЯИ, P13-4014, Дубна, 1968.
4. Н.Н.Михайлов, А.Я.Когановский. ПТЭ, 3, 194 /1961/.
5. В.П.Алфименков и др. ЯФ, 17, 13 /1973/.
6. В.П.Алфименков и др. Препринт ОИЯИ, P3-8004, Дубна, 1974.
7. В.П.Алфименков и др. III Всесоюзная конференция по нейронной физике, Киев, 1975.
8. В.П.Алфименков и др. Препринт ОИЯИ, P3-8599, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 октября 1975 года.