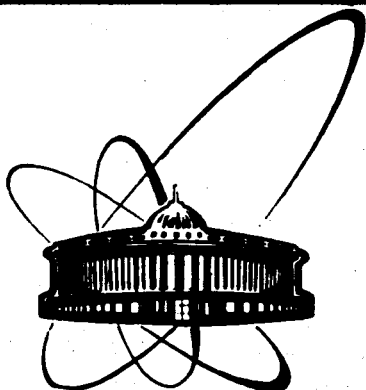


89-470



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

К 403

P8-89-470

Ю.Ф.Киселев, А.Н.Черников

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
В ДИАПАЗОНЕ 0,028 - 4,2 К

Направлено в журнал "Cryogenics"

1989

Киселев Ю.Ф., Черников А.Н.

P8-89-470

Устройство для получения низких температур
в диапазоне 0,028 - 4,2 К

Описан рефрижератор с двумя циклами охлаждения: растворения ^3He в ^4He и испарения ^3He или ^4He , включенными на общую тепловую нагрузку. Диапазон рабочих температур рефрижератора составляет 0,028÷4,2 К и перекрывается в одном опыте без отогрева путем простых переключений во внешних цепях газовых коммуникаций. При работе в режиме с испарительным циклом охлаждения рефрижератор позволяет реализовать недоступную для растворения область температур выше 0,75 К. При одновременной реализации двух циклов суммарная хладопроизводительность устройства в интервале $0,4 \text{ K} \leq T \leq 0,75 \text{ K}$ может значительно превосходить хладопроизводительность цикла растворения. Исследована температурная зависимость теплоподвода к камере растворения за счет переконденсации сверхтекучей пленки и теплопроводности газа.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Kiselev Yu.F., Chernikov A.N.

P8-89-470

Installation for Producing Low Temperatures
in the 0.028÷4.2 K Range

The paper describes the refrigerator employing the dilution of ^3He in ^4He and evaporation of ^3He or ^4He cycles that contribute to the total heat load. The refrigerator operates over the temperature range 0.028÷4.2 K, which may be overlapped by simple change-over in the external gas communications. Using the evaporation cycle, one can reach the region above 0.75 K, which is inaccessible for dilution. In the joint mode when both the evaporation and dilution cycles are in use the total cooling power of the refrigerator at $0.4 \text{ K} \leq T \leq 0.75 \text{ K}$ can be much higher than the cooling power of the ^3He - ^4He dilution cycle. The refrigerator allows one to study the temperature dependence of the heat gain caused by a recondensating a superfluid film and the heat conduction of the gas.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1989

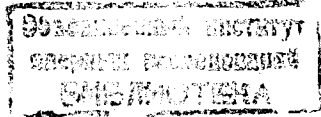
ВВЕДЕНИЕ

Для исследования свойств конденсированных сред при низких температурах, как правило, требуется рефрижератор, обеспечивающий стационарные температуры при большой холодопроизводительности в широком диапазоне, $0,01 \pm 4,2$ К. Такие исследования можно выполнить, применяя по отдельности рефрижератор испарительного типа с ^3He , ^4He и рефрижератор растворения ^3He в ^4He /1/ либо комбинированный рефрижератор /2/. Общим для данных устройств является использование одного и того же хладагента как для получения низкой температуры, так и для охлаждения исследуемой системы. В данной работе описан рефрижератор, включающий два контура циркуляции: с циклом растворения ^3He в ^4He и с циклом испарения ^3He или ^4He , которые работают на общую нагрузку /3/. Тепловая связь между двумя контурами охлаждения осуществляется через теплообменник /3/ между камерой растворения ^3He в ^4He и сборником моноизотопного гелия, снабженным дополнительным трактом откачки. Устройство допускает как одновременное, так и раздельное включение испарительного и растворительного циклов охлаждения. При работе только с испарительным циклом охлаждения рефрижератор позволяет реализовать недоступную для растворения область температур выше $0,75$ К. В совместном режиме, т.е. при одновременно включенных испарительном и растворительном циклах охлаждения, суммарная холодопроизводительность устройства при $0,4 \leq T \leq 0,75$ К может значительно превосходить холодопроизводительность цикла растворения ^3He в ^4He , что может быть использовано для исследования возможности создания поляризованных мишеней замороженного типа с ускоренным временем накачки поляризации. При охлаждении путем растворения ^3He в ^4He сборника со смесью изотопов ^3He и ^4He произвольного состава в рефрижераторе удается измерить температурную зависимость теплоподвода к камере растворения за счет пере конденсации сверхтекучей пленки и теплопроводности газа в тракте откачки сборника. В свою очередь данные по этому тепловоду значительно упрощают конструирование устройств подобного типа. Но главным преимуществом является возможность получения широкого диапазона температур в одном опыте без отогрева или перемещения исследуемого образца путем простых переключений во внешних цепях газовых коммуникаций, что, на наш взгляд,

оправдывает некоторые осложнения общепринятой схемы рефрижератора растворения, связанные с добавлением испарительного цикла охлаждения. Наинизшая достигнутая температура в режиме растворения ^3He в ^4He составляет 28 мК.

КОНСТРУКЦИЯ ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ СТУПЕНИ ТЕПЛОБМЕННИКИ

Схема охлаждающей ступени представлена на рис.1. Она содержит обычные элементы рефрижератора растворения ^3He в ^4He , а именно: 1К-ванну /1/, ванну испарения /2/ с трактом откачки /3/, непрерывный /4/ и трехступенчатый /5/ теплообменники, камеру растворения ^3He в ^4He /6/ и контур циркуляции ^3He /7/ концентрированной фазы, в который входят конденсатор ^3He /8/, теплообменник /9/ в ванне испарения и дроссель /10/ - капилляр длиной 40 см и диаметром $0,2$ мм. Забор гелия в 1К-ванну осуществляется через дроссель /11/ по сифону /12/ /4/. Кроме того, в ступень введены дополнительные элементы, обеспечивающие работу устройства в испарительном режиме охлаждения. К ним относятся сборник гелия /13/, который через теплообменник /14/ имеет тепловой контакт с камерой растворения /6/, тракт откачки /15/ сборника /13/, дополнительная линия конденсации ^3He , ^4He /16/, включающая конденсатор /17/, дроссель /18/ и нагреватель /19/ жидкого гелия, поступающего в сборник /13/. Сборник /13/, с расположенной внутри него камерой растворения /6/, припаян к тракту откачки /15/. Последний выполнен из нержавеющей стальной /X18H10T/ трубки $\phi 12 \times 0,2$, которая с целью уменьшения теплопритока к камере растворения имеет тепловые контакты с 1К-ванной, ванной испарения, теплообменником /5/ и защищена от излучения внутренними радиационными экранами /20/. Теплообменник /14/ представляет собой медный цилиндр, на который как со стороны сборника /13/, так и со стороны камеры растворения /6/ напечен медный мелкодисперсный порошок. Для повышения теплоотдачи от газовой фазы к стенкам камеры растворения теплообменная поверхность сборника /13/ выполнена в виде ребер /5/. Вследствие теплового контакта камеры растворения и сборника минимальная температура рефрижератора в растворительном режиме зависит от теплопритока по тракту откачки /15/ сборника. Так как этот теплоприток может быть достаточно большим в зависимости от температуры и состава гелия сборника, то система откачки ^3He из ванны испарения и блок теплообменников должны обеспечивать работу с соответствующей высокой скоростью циркуляции. Непрерывный теплообменник Фроссати /6/ удовлетворяет этому условию. Наш непрерывный теплообменник состоит



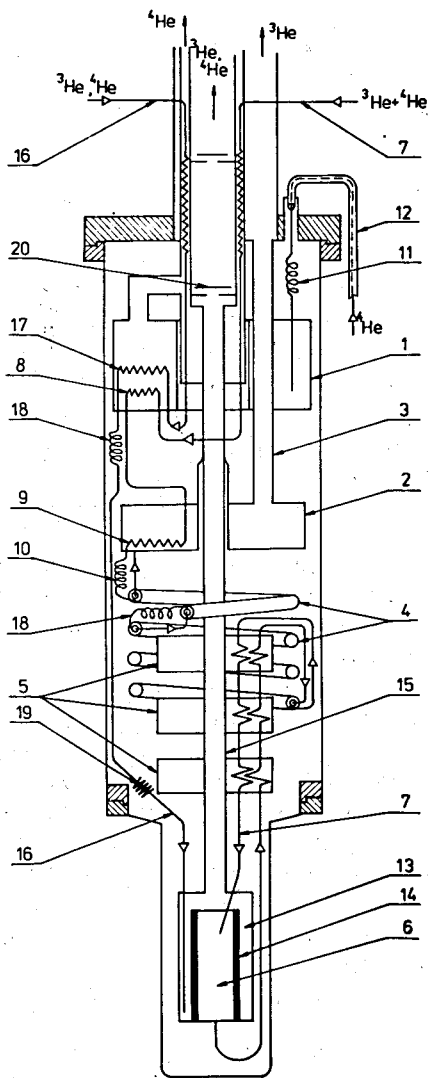


Рис.1. Схема низкотемпературных узлов рефрижератора.

из двух одинаково изготовленных секций длиной 1 м и 0,35 м. Для изготовления секции стальной /X18H10T/ капилляр $\phi 2 \times 0,5$ навивается на стальную оправку $\phi 2$ мм виток к витку. В результате деформации капилляра после намотки его поперечное сечение представляет узкую щель для прохода концентрированной фазы. Полученная таким образом спираль плотно вставлялась в трубку $\phi 5 \times 0,3$, закрывалась концевыми медными патрубками и запаивалась твердым припоем ПСР-40. Затем секции сворачивались в спираль диаметром 100 мм. Каналы для концентрированной фазы соединялись между собой дросселем в виде капилляра длиной 100 см и внутренним диаметром 0,4 мм. Площадь поверхности теплообмена основной секции со стороны концентрированной фазы составляет 160 см^2 , со стороны разбавленной фазы - 214 см^2 , дополнительной секции - 56 см^2 и 75 см^2 соответственно.

Такой непрерывный теплообменник при скорости циркуляции $0,3 \text{ ммоль} \cdot \text{с}^{-1}$ позволяет достигать температуру 39 мК, если сборник /13/ отсоединен от трак-

та откачки /15/. Теплоприток, вносимый трактом откачки, повышал температуру камеры растворения до 52 мК. С целью понижения конечной температуры и повышения хладопроизводительности цикла растворения при низких температурах последовательно с непрерывным теплообменником был установлен трехступенчатый порошковый теплообменник. При его изготовлении мы следовали в основном работе /7/. Схема одного из блоков теплообменника приведена на рис.2. Блок /рис.2/ состоит из медной подложки /1/, на которую с обеих сторон напечен медный порошок /2/ с поверхностью

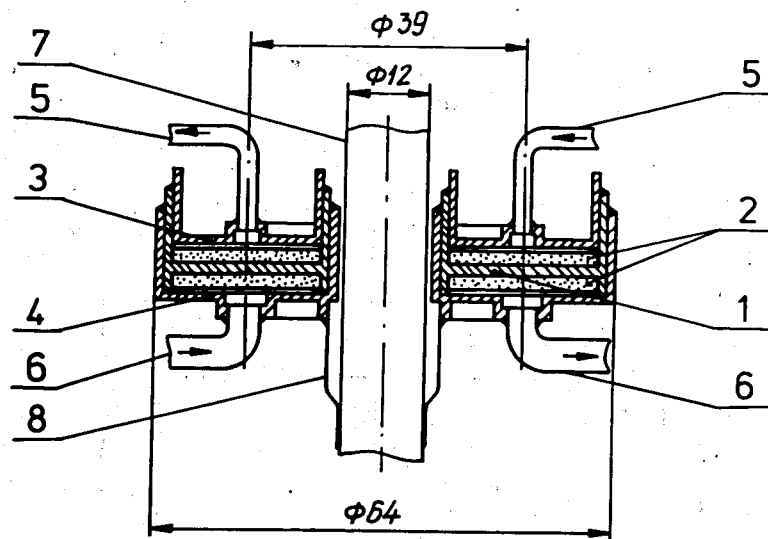


Рис.2. Конструкция блока ступенчатого теплообменника.

теплообмена по $0,5 \text{ м}^2$, и двух медных крышек /3,4/. В крышки твердым припоем впаяны патрубки /5,6/ для ввода-вывода концентрированной и разбавленной фаз. После сборки блока крышки запаивались припоем ПОС-60. Затем три таких блока, составляющих ступенчатый теплообменник, аксиально крепились к тракту откачки сборника /7/ с помощью трубки /8/, припаянной к крышке теплообменника /4/.

СИСТЕМА ОТКАЧКИ И ГАЗОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ

На рис.3 представлена схема откачных и газовых коммуникаций. По своему функциональному назначению схема состоит из двух контуров циркуляции ^3He , ^4He /Сиркле 1,2/, насосной группы для обеспечения циркуляции газа по каждому контуру, секции вакуумных испытаний, секции измерения давлений. В систему циркуляции газа входят охлаждаемые жидким азотом ловушки /NC1, NC2/ для очистки циркулирующего газа в каждом контуре, бустерный насос /NH1/ - НВМ-2500 с ловушкой масляных паров /BL1/, дополнительно вакуумированные форвакуумный насос /N11/ - НВЗ-20 и откачной агрегат /NP1/ - АВР-150. В секцию вакуумных испытаний входят диффузионный /ND1/, форвакуумный /N14/ насосы и течеискатель. Для измерения давления используются оптические дифференциальные манометры /P1/ и /P2/. Откачка 1К-ванны осуществляется насосом /N13/ - НВЗ-75. Вспомогательные операции по перекач-

ния и в С3 объемом 150 л - смесь ^3He и ^4He для растворительного цикла охлаждения. Дифференциальные клапаны V58, V59 рассчитаны на перепад давления 0,5 атм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рефрижератор может работать в следующих режимах: с циклом растворения ^3He в ^4He , с циклом испарения ^3He или ^4He и совместном, то есть одновременно с растворительным и испарительными циклами охлаждения. В случае, если сборник вакуумирован, рефрижератор представляет обычную машину растворения ^3He в ^4He . Тогда рефрижератор имеет следующие основные характеристики: а/ минимально достижимая температура составляет 28 мК и определяется в основном теплопритоком, вносимым трактом, откачки сборника; б/ обеспечивается циркуляция до $2,5 \text{ ммоль} \cdot \text{с}^{-1}$ с откачкой ванны испарения насосом НВБМ-2500 и циркуляция до до $2 \text{ ммоль} \cdot \text{с}^{-1}$ - с откачкой АВР-150 /минимальная температура 40 мК/; в/ время захлаживания от 0,45 К до 0,14 К составляет 12 мин и до 28 мК - около 1 часа. Машина растворения работает устойчиво при любой температуре в диапазоне $0,028 \pm 0,7 \text{ К}$, хорошо воспроизводит зависимости хладопроизводительности от температуры камеры растворения и циркуляции.

На рис.4 приведены графики хладопроизводительности рефрижератора в режиме растворения ^3He в ^4He для трех случаев, когда сборник /13, рис.1/ частично заполнен ^4He , коммерческим ^3He с примесью примерно 0,2% ^4He и когда в сборнике вакуум /ванна испарения имела одинаковый режим для всех трех случаев/. На основании этих данных на рис.5 построена зависимость дополнительного теплопритока к камере растворения от сборника с изотопами ^3He и ^4He . Как видно из графиков, в случае ^4He теплоприток из-за наличия сверхтекучей пленки не изменяется в диапазоне

$0,12 \leq T \leq 0,22 \text{ К}$, что, по-видимому, указывает на неизменную скорость переноса массы ^4He по пленке в этой области температур. Наинизшая температура камеры растворения при этом со-

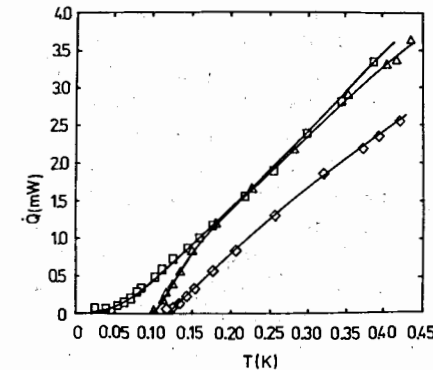


Рис.4. Хладопроизводительность растворительного цикла рефрижератора: □ - в сборнике вакуум, Δ - в сборнике ^3He , ◇ - в сборнике ^4He .

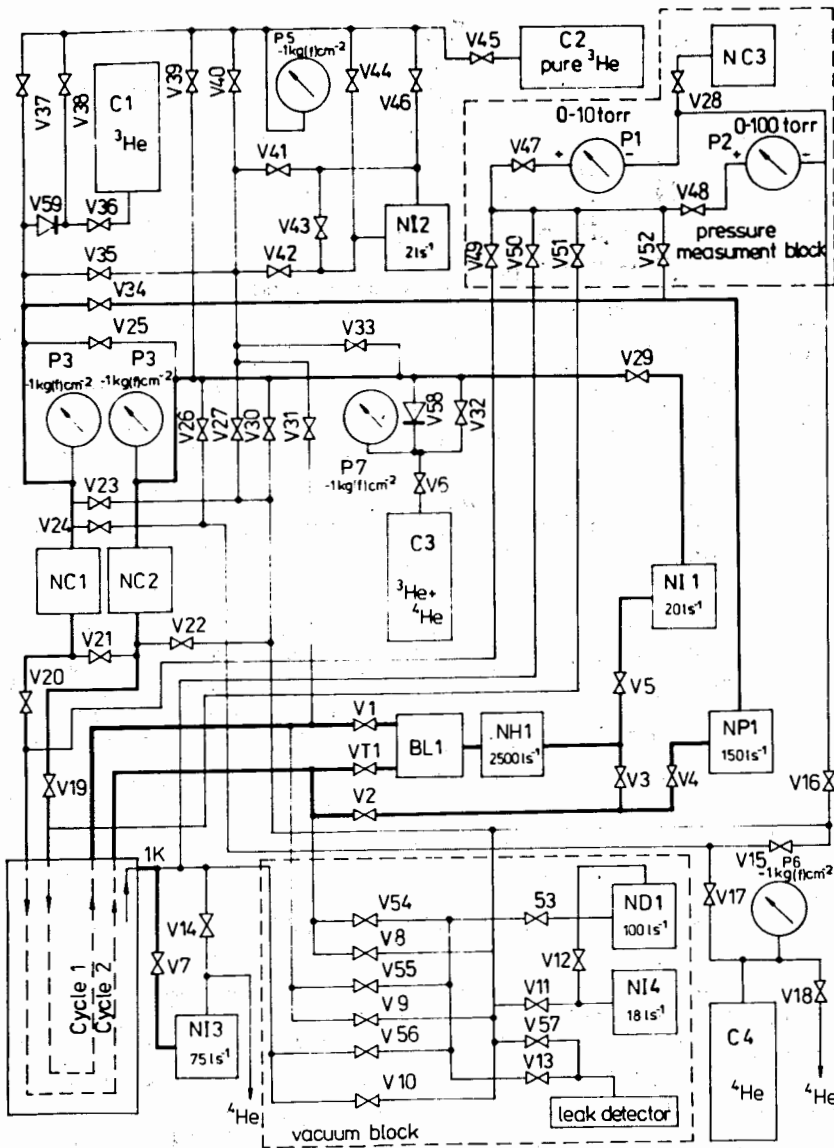


Рис.3. Схема откачных и газовых коммуникаций установки.

ке газа выполняются при помощи герметизированного насоса /NI2/ - НВГ-2. Для хранения чистого ^3He и смеси изотопов используются три баллона. В баллоне С1 объемом 50 л хранится ^3He , используемый для подбора смеси ^3He - ^4He , в баллоне С2 объемом 150 л - чистый ^3He для испарительного цикла охлажде-

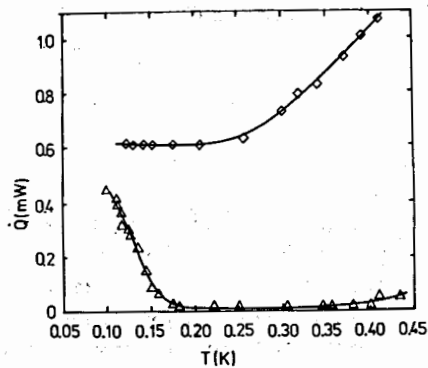


Рис.5. Теплоприток к камере растворения за счет сверхтекучей пленки: Δ - в сборнике ^3He , \diamond - в сборнике ^4He .

ставила 0,12 К. Как и ожидалось, совершенно другая зависимость теплопритока от температуры наблюдается, когда в сборнике находится слабый раствор ^4He в ^3He . В этом случае теплоприток при $T \leq 0,17$ К резко возрастает с по-

нижением температуры. Если принять $T = 0,17$ К за температуру расслоения смеси ^3He и ^4He , то, следуя Эдвардсу и Даунту^{8/}, можно определить молярную концентрацию ^3He - X_3 в верхней фазе:

$$1 - X_3 = 1,13T^{3/2} \exp(-0,71/T), \quad /1/$$

где $[T]$ в К, то есть $X_3 = 0,999$, что хорошо согласуется с техническими данными на используемый ^3He . Наинизшая температура камеры растворения для данного состава изотопов в сборнике составила 98 мК. При дополнительной очистке от ^4He в обсуждаемом режиме была достигнута температура 58 мК. Интересно отметить, что по мере повышения температуры теплоподвод к камере растворения за счет теплопроводности газа в тракте остается пренебрежимо малым вплоть до $T = 0,35$ К, затем только возрастает до 0,5 мВт при $T = 0,45$ К и далее сохраняется практически неизменным по крайней мере до $T = 0,75$ К. Если отогреть сборник до температуры $1 \pm 1,5$ К, то слабый раствор ^4He в ^3He легко удаляется откачкой, а сборник вакуумируется. Для удаления чистого ^4He из сборника необходимо отогреть 1К-ванну и сборник до температуры выше λ -точки. Таким образом, процедура заполнения сборника и его вакуумирование может быть повторена многократно. После вакуумирования сборника теплоподвод к камере растворения становится минимальным и рефрижератор восстанавливает свои характеристики. На рис.6 приведены графики $\dot{Q}(T)$ в диапазоне температур $0,45 \div 0,75$ К. Указанный диапазон температур можно получить в испарительном, растворительном и совместном режимах охлаждения. В испарительном режиме зависимость $\dot{Q}(T)$ получена с эффективной скоростью откачки $4,5$ л·с⁻¹. В совместном режиме хладопроизводительность рефрижератора суммируется из хладопроизводительностей обоих циклов. Кривые суммарной хладопроизводительности для двух значений температуры ванны испарения 0,9 К и 1,03 К приведены на рис.6. Обычно для пони-

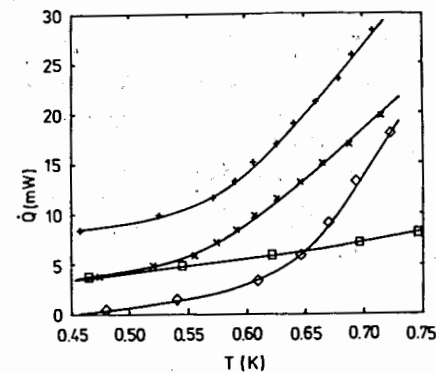


Рис.6. Хладопроизводительность рефрижератора в диапазоне $0,45 \div 0,75$ К: \diamond - хладопроизводительность испарительного цикла рефрижератора, в растворительном контуре циркуляция равна нулю; \square - хладопроизводительность растворительного контура рефрижератора, в сборнике ^3He ; +, x - хладопроизводительность рефрижератора при одновременной работе растворительного и испарительного контура с ^3He . В режимах "□", "x" температура ванны испарения 0,9 К, в режиме "+" - 1,03 К.

жения концентрации ^4He в тракте откачки ванны испарения температура последней поддерживается на уровне $0,6 \div 0,75$ К. Работа с "перегретой" ванной испарения - выше $0,75$ К - характерна для мощных рефрижераторов растворения, применяемых, в частности, для поляризованных мишеней^{9/}. Из графиков $\dot{Q}(T)$ на рис.6 также следует, что приведенная в данной работе конструкция непрерывного теплообменника позволяет реализовать режим с "перегретой" ванной испарения и достигать высокой хладопроизводительности при устойчивой работе рефрижератора. В этом режиме откачка ванны испарения обеспечивается двухроторным насосом. Время захлаживания рефрижератора в растворительном режиме со сконденсированным в сборник ^3He от 0,45 К до 0,14 К примерно в 1,5 раза больше, чем без ^3He .

Диапазон температуры выше 0,75 К вплоть до 4,2 К рефрижератор обеспечивает в испарительном режиме с изотопами ^3He или ^4He в сборнике. В качестве теплообменной среды в камере растворения может быть смесь изотопов гелия любого состава. Чистые изотопы ^3He или ^4He удобно использовать как газовый термометр. Практически регулировка температуры в широком диапазоне выполняется путем нагрева входящего потока жидкого гелия специальным нагревателем с развитой поверхностью нагрева, который установлен на вводимом капилляре /см. рис.1, поз.19/.

В работе описано устройство и приведены характеристики рефрижератора для получения стационарных температур в широком диапазоне, $0,028 \div 4,2$ К. Рефрижератор может работать в испарительном, растворительном и совместном режимах. Практическая работа

с рефрижератором показывает, что совмещение испарительного и растворительного циклов в одном лабораторном устройстве особенно полезно для получения справочной информации о свойствах конденсированных сред в широком диапазоне низких температур.

Мы выражаем глубокую признательность К.Н.Зиновьевой за калибровку термометров, Б.С.Неганову и А.Ф.Прудкогляду за консультации, А.О.Орлову и И.З.Крахтинову за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоунаспаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир, 1977.
2. Неганов Б.С., Борисов Н.С., Павлов А.с.579508 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1977, № 41, с.140.
3. Киселев Ю.Ф. А.с. 960503 /СССР/. - Опубликовано в ОИ, 1982, № 35, с.143.
4. Parpia J.M., Rhodes T.L. - Rev. Sci. Inst., 1984, 55, p.1165.
5. Masuda Y. et al. - Dinamically Polarized Proton Filter as a Neutron Spin Polarizer. Using a ^3He - ^4He Heat Exchanger. KEK, Preprint 96-37, 1986.
6. Frossati G. et al. - Conventional Cycle Dilution Refrigeration Down to 2.0mK. Proc. ULT Hakone Symposium, 1977, p.205.
7. Pavlov V.N. - Cryogenics, 1982, 6, p.318.
8. Edwards D.O., Daunt J.G. - Phys. Rev., 1961, v.124, 3, p.640.
9. Борисов Н.С. и др. Препринт ОИЯИ Р13-86-734, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июня 1989 года.