

Препринт ЕФИ-937(88)-86

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՏԻՏՈՒՏ**  
**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**А.А.АРОЯН, М.А.АРУТЮНЯН, Р.Т.МИНА,**  
**С.Т.БОЛДАРЕВ, В.М.МИШАЧЕВ, Р.Г.АМАМЧЯН**

**РЕФРИЖЕРАТОР РАСТВОРЕНИЯ С БЕСКЛАПАННОЙ**  
**АДСОРБЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ  $^3\text{He}$**

**ЦНИИатоминформ**

**ЕРЕВАН-1986**

Հ.Հ. ՀԱՐՈՅԱՆ Մ.Հ. ՀԱՐՈՒՅՈՒՅՈՒՅԱՆ Ռ.Ք. ՄԻՆԱ  
Ս.Տ. ԲՈՂԴԱՐԵՎ \* Վ.Մ. ՄԻՇԱԶԵՎ \* Ռ.Գ. ՀԱՄԱՄՉՅԱՆ \*

ԼՈՒԽՄԱՆ ՍԱՌՆԱՐԱՆ՝  $^3\text{He}$ -ի ՇՐՋԱՆԱՌՈՒՅՈՒՅԱՄԲ ԱՆՓԱՆԱՆ  
ԿԼԱՆՈՂ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՎ

Անփական կլանող,  $^3\text{He}$  /2,3/-ի արտածման համակարգի հիման վրա առաջին անգամ ստեղծված է երկաստիման, անընդհատ գործող սառնարան: Ստորին /լուծող/ աստիմանի նվազագույն ջերմաստիճանը կազմում է  $\sim 0,2\text{ K}$ : Հետազոտված է սառնարանի ստորին և վերին աստիմանների փոխադարձ կապը՝ ստորին աստիմանում  $^3\text{He}$ -ի շրջանառության տարբեր արագությունների դեպքում: Հաշվված են խտացուցիչ պոմպի անհրաժեշտ բնութագրերը՝ կախված գոլորշացուցչի և լուծման ավազանի ջերմաստիճանից, որոշված են սառնարանի կատարելագործման ուղիները: Զննարկված է սառնարանում  $^4\text{He}$ -ի գերհոսուն թաղանթով տեղափոխման հարցը և նրա ազդեցությունը սառնարանի բնութագրերի վրա:

Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ

ԵՐԻՎԱՆ 1986

\* ,,Հելիումմեքենա,, գիտաարտադրական միավորում

© Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИатоминформ) 1985г.

H.H.HAROYAN, M.H.HARUTYUNYAN, R.T.MINA,  
S.J.BOLDAREV\*, V.M.MISHACHEV\*, R.G.HAMAMCHYAN\*

A DILUTION REFRIGERATOR WITH NON-VALVE  
ADSORPTION SYSTEM OF  $^3\text{He}$  CIRCULATION

For the first time a two stage continuous action dilution refrigerator was constructed based on a non-valve adsorption system of  $^3\text{He}$  pumping [2,3] as an upper stage. The minimum temperature of the lower (dilutional) stage was  $\sim 0.2\text{K}$ . The interrelation of the lower and upper refrigerator stages at different  $^3\text{He}$  circulation rates in the lower was studied. Some essential characteristics of the condensation pump dependence on temperature of still and mixing chamber were calculated and the ways to refrigerator development were determined. The presence of transfer over the superfluid  $^4\text{He}$  film in dilution refrigerators with condensation pumping and its influence on the parameters of refrigerator was discussed.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1986

---

\* NPO "Gelimash"

УДК 536.483:621.59

А.А.АРОЯН, М.А.АРУТКНЯН, Р.Т.МИНА,  
С.Т.БОЛДАРЕВ<sup>ж</sup>, В.М.МИШАЧЕВ<sup>ж</sup>, Р.Г.АМАМЧЯН<sup>ж</sup>

РЕФРИЖЕРАТОР РАСТВОРЕНИЯ С БЕСКЛАПАННОЙ  
АДСОРБЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ  $^3\text{He}$

Впервые на базе бесклапанной адсорбционной системы откачки  $^3\text{He}$  [2,3], служащей верхней ступенью, построен двухступенчатый рефрижератор растворения непрерывного действия. Минимальная температура нижней (растворительной) ступени составляет  $\sim 0,2$  К. Исследована взаимосвязь нижней и верхней ступеней рефрижератора при различных скоростях циркуляции  $^3\text{He}$  в нижней ступени. Рассчитаны необходимые характеристики конденсационного насоса в зависимости от температуры испарителя и ванны растворения, определены направления совершенствования рефрижератора. Рассмотрен вопрос о наличии переноса по сверхтекучей пленке  $^4\text{He}$  в рефрижераторах растворения с конденсационной откачкой и его влияние на параметры рефрижератора.

Ереванский физический институт

Ереван 1966

---

<sup>ж</sup> НПО "Гелиймаш"

Рефрижератор растворения с насосом, работающим на жидком гелии, охлаждаемым откидной  $^3\text{He}$ , был впервые осуществлен В.С. Эдельманом [1] еще в 1951 году. Однако рефрижераторы подобного типа до настоящего времени не нашли применения в технике сверхнизких температур, по-видимому, из-за трудностей, препятствующих увеличению скорости циркуляции рабочей смеси.

Вместе с тем, именно такая модификация рефрижератора растворения пригодна для работы в сочетании с бесклапанным адсорбционным криогенным рефрижератором (АКР), предложенным в [2] и успешно осуществленным в Брестском физическом институте [3]. Как показано в настоящей работе, температурный уровень и холодопроизводительность АКР вполне достаточны для конденсации паров рабочей смеси. Управление АКР практически идентично управлению рефрижератором растворения с "клапанной" адсорбционной системой циркуляции [4,5]. Существенным их отличием является отсутствие в АКР низкотемпературных вакуумных клапанов адсорбционных насосов. Исключение этих, несомненно, сложных элементов конструкции рефрижератора позволит повысить надежность установки, сохранив все преимущества криогенной системы циркуляции.

Целью настоящей работы было создание рефрижератора растворения с конденсационным насосом на базе бесклапанного АКР и выявление элементов конструкции, ответственных за согласование ступеней при их совместной работе.

### Устройство рефрижератора

Верхней ступенью двухступенчатого рефрижератора служил АКР [3] непрерывного действия. АКР состоит из двух попеременно работающих адсорбционных насосов, каждый из которых соединен трубой, пропущенной через откачиваемую ванну  $^4\text{He}$  с ванной  $^3\text{He}$ . Обе ванны  $^3\text{He}$  имеют тепловую связь с помощью тепловых труб с третьей ванной  $^3\text{He}$  (называемой в [3] и далее в тексте общей ванной), служащей аккумулятором холода на уровне температуры  $\sim 0,5$  К, измеряемой термометром  $T_I$ . Конструкция и работа АКР достаточно подробно изложена в [3].

Устройство нижней ступени растворения аналогично [1]. Эта ступень растворения состоит из конденсационного насоса, ванны испарения, низкотемпературного теплообменника и ванны растворения. Дно общей ванны служит "холодной пластиной" конденсационного насоса; открытая для доступа паров поверхность составляла  $18 \text{ см}^2$ .

Ванна испарения представляет собой плоскую цилиндрическую камеру из нержавеющей стали со съёмной (на индиевом уплотнении) крышкой. Диаметр камеры 48 мм, высота 9 мм. Крышка ванны испарения снабжена диафрагмой диаметром 2 мм для ограничения

переноса пленки сверхтекучего  $^4\text{He}$ . Сверху к крышке припаяна труба откачки из нержавеющей стали, диаметром  $12 \times 0,3$  мм, верхний конец которой выведен в полость конденсационного насоса на высоту около 4 мм над отверстием для стока конденсата в дне полости. Нагреватель ванны испарения выполнен в виде кольца из медной ленты сечением  $3 \times 0,3$  мм, расположенного в жидкости вблизи дна испарителя; конец медной ленты выведен через тепловую развязку (из мельхиоровой трубки длиной  $\sim 15$  мм со стенкой 0,25 мм) в вакуумную полость, где на нем смонтирована электрическая обмотка. Термометр  $T_2$  приклеен снаружи на донышко испарителя.

Теплообменник - наиболее ответственный узел ступени растворения: его конструкция должна обеспечивать, помимо общих для всех рефрижераторов растворения требований, также малое гидравлическое сопротивление канала концентрированного потока, в котором жидкость движется под действием малого избыточного гидростатического напора столба жидкости в капилляре слива конденсата.

Теплообменник выполнен противоточным, типа "труба в трубе", с насадкой из спеченного металлического порошка для развития поверхности теплообмена по обоим потокам: концентрированному и разбавленному. Длина теплообменника 90 см, диаметр внутренней трубки  $2,4 \times 0,2$  мм. Насадка в обоих потоках спечена из смеси двух фракций бронзового порошка (размеры сферических частиц 250-300 мкм и 40-50 мкм). Расчетная площадь поверхности теплообмена составила около  $900 \text{ см}^2$  по разбавленному потоку и  $1000 \text{ см}^2$  по концентрированному. В каждом потоке

оставлен свободный от насадки канал сечением  $\sim 1 \text{ мм}^2$ . Измеренные значения гидравлических импедансов равны  $2,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  для разбавленного потока и  $2,9 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$  для концентрированного.

Согласно сделанным оценкам, при температуре ванны растворения 20 мК заданная скорость циркуляции  $\sim 100 \text{ мк моль/с}$  обеспечивается при избыточной; в сравнении с равновесным значением, высоте столба  $^3\text{He}$  в капилляре слива конденсата около 12 мм.

В ванне растворения расположены термометр  $T_3$  и нагреватель. Ступень растворения вместе с нижней частью АКР окружена экраном, припаянным к откачиваемой ванне  $^4\text{He}$  (конденсатору АКР).

Контроль температуры в ходе эксперимента осуществлялся с помощью полупроводниковыми термометрами сопротивления  $T_1, T_2, T_3$ .

Термометр  $T_1$  изготовлен из угольного композита в ИФП АН СССР; он калибровался и использовался в предыдущей серии экспериментов на АКР [3]. Остальные два термометра изготовлены [6] из легированного германия. После завершения экспериментов с двухступенчатым рефрижератором без отогрева прибора выше 10–20 К была проведена градуировка всех термометров в диапазоне 0,6–1,2 К по упругости насыщенных паров  $^3\text{He}$ , измеряемых манометром Мак-Леода. При обработке результатов эксперимента использовались градуировки  $T_1$  и  $T_2$  до минимальной зарегистрированной температуры 0,48 К. Погрешность измерения температуры может быть оценена из рис. 1, на котором представлены данные градуировки термометров и кривые, по которым определяли

температуру при обработке результатов. Следует отметить, что в [3] использовали несколько иную экстраполяцию для термометра  $T_1$ , занижавшую температуру на  $\sim 0,02$  К при 0,5 К по сравнению с представленной на рисунке кривой.

Термометр ванны растворения  $T_3$  с самого начала предполагалось использовать лишь для качественной регистрации получения сверхнизких температур в рефрижераторе и полуколичественной оценки уровня достигаемой температуры по типичной термометрической характеристике полупроводниковых термометров, предложенной в [6]. Как видно из рисунка, уже при  $T \lesssim 1,2$  К наклон кривой начинает уменьшаться при понижении температуры. Обычно подобные термосопротивления при дальнейшем понижении температуры очень быстро теряют чувствительность, благодаря переходу к участку насыщения [6]. Вследствие этого измеряемые в эксперименте значения сопротивления  $T_3$  ниже диапазона градуировки пригодны лишь для грубой оценки верхнего предела наблюдаемой температуры. Для придания этой оценке количественного характера зависимость между  $R$  и  $T$  была методом наименьших квадратов аппроксимирована уравнением

$$\alpha + \beta \cdot \ln R + c (\ln R)^2 = T^n,$$

причем была подобрана степень  $n$  для линейризации этого уравнения ( $c=0$ ). Результаты аппроксимации показаны на рис. I сплошной линией, а экстраполяции - пунктиром.

### Изложение экспериментов, результатов и их обсуждение

I. Общая продолжительность эксперимента, во время которого

температура верхней ступени поддерживалась на уровне 0,5-0,7 К, составляла более двух суток. Измеренный на исходе первых суток паразитный теплоприток к обеим ступеням рефрижератора был на уровне 0,9 мВт, что отвечало величине, указанной в [3].

Запуск ступени растворения после конденсации смеси и вывода АКР в непрерывный режим сводится к включению нагревателя в ванне испарителя. Дальнейший переход с режима на режим осуществлялся, как и в обычных рефрижераторах растворения, выбором соответствующей мощности, выделяемой в испарителе.

Нижняя ступень растворения дважды запускалась в работу при температуре  $T_3$  ванны растворения  $\sim 0,6-0,7$  К путем подачи на нагреватель мощности. Во время каждого запуска после того, как температура ванны растворения не превышала 0,3 К ( $R_3 \geq 700$  Ом), путем измерения мощности в интервале от 0,2-1,6 мВт было опробовано несколько режимов работы.

Выход ступени растворения в стационарный режим определялся по прекращению систематического дрейфа показаний всех трех термометров в течение длительного промежутка времени (1-2 ч). Полной стабильности показаний термометров в стационарных режимах не наблюдалось; для  $T_1$  и  $T_2$  это связано с тем, что сама температура общей ванны, как отмечалось в [3], слегка колеблется при постоянной тепловой нагрузке в зависимости от положения уровня  $^3\text{He}$  в ванне, вызывая ответные колебания температуры испарителя. Термометр же ванны растворения  $T_3$  использовался при этом в области насыщения, и его показания существенно не менялись. Установление нового стационарного режима при переключении мощности происходило за время порядка 0,5-1 ч.

2. В таблице приведены усредненные значения температуры общей ванны  $^3\text{He}$  и испарителя в пяти стационарных режимах работы ступени растворения.

Таблица

№ режима	Мощность в ванне испарения, (мВт)	Температура общей ванны $^3\text{He}$ (К)	Температура ванны испарения, (К)
1	0,20	0,52	0,64
2	0,40	0,54	0,74
3	0,62	0,55	0,80
4	0,90	0,61	0,98
5	1,60	0,63	1,10

Режимы 1 и особенно 5 были сравнительно с остальными непродолжительными - около 1 ч и 30 мин, соответственно - после переключения мощности испарителя. Возможно, стационарный режим в них не был достигнут. В таблице не приведены данные о показаниях нижнего термометра  $T_3$  (они, разумеется, фиксировались), поскольку он использовался в области насыщения градуировочной кривой и не мог адекватно реагировать на изменения температуры ванны растворения. Однако в режиме 1 он показал 800 Ом, в режиме 2 при втором запуске максимально зарегистрированное значение ~1300 Ом, а в режимах 3 и 4 колебался в пределах 720-780 Ом. Экстраполяция градуировочной кривой термометра  $T_3$  (рис.1) к предельному значению 1300 Ом позволяет оценить температурный уровень ванны растворения не выше, чем в 0,1-0,2 К. Эта оценка соответствует выводам, получаемым при более детальном рассмотрении работы испарителя и конденсационного насоса, которая

следует ниже.

3. Особенность рефрижератора растворения с конденсационным циклом состоит в том, что для его работы разность температур между испарителем и конденсационным насосом должна быть значительной. Существование ее объясняется малым (в силу малости концентрации  $^3\text{He}$  в жидкости) давлением паров над испарителем, которое при достаточно низкой температуре ванны растворения ( $T_m < 0,1 \text{ K}$ ) на порядок ниже давления насыщенных паров  $^3\text{He}$  при температуре испарителя.

В идеальном случае ( предельно малые температуры испарителя), когда пар можно считать чистым  $^3\text{He}$ , максимальная температура  $T_x$  холодной стенки насоса определится, очевидно, как температура, при которой давление насыщенных паров  $^3\text{He}$  равно давлению пара над испарителем. Присутствие заметного количества  $^4\text{He}$  в парах испарителя осложнит картину, однако поскольку в непрерывном режиме исходящий из испарителя пар охлаждается полностью, концентрация в конденсате должна быть равна (без учета влияния пленки  $^4\text{He}$ ) концентрации пара над испарителем  $X_{v_s}$ . При этом, если жидкость и пар в полости конденсационного насоса находятся в равновесии, устанавливается, в зависимости от остальных условий, более или менее значительный градиент концентрации пара от испарителя к конденсационному насосу. Температура же конденсационного насоса  $T_K$  не должна превышать ту, при которой упругость насыщенного пара над жидкостью с концентрацией  $X_{v_s}$  равна давлению паров в испарителе.

Таким образом, если считать, как обычно, давление и концентрацию в ванне испарения зависящей от температур ванны раство-

рения  $T_m (= T_3)$  и испарения  $T_s (= T_2)$ , существует зависящая от тех же параметров допустимая температура конденсационного насоса  $T_K (= T_I)$ , выше которой процесс идти не может.

На рис. 2 представлена расчетная зависимость  $T_K$  от  $T_s$  при четырех значениях температуры ванны растворения  $T_m$  (от 0 до 0,3 К). Данные о концентрации ( $X_{v_s}$ ) и давлении ( $P_s$ ) паров испарителя были взяты из [7]; давление паров над растворами в полном диапазоне концентраций - из [7-9]. Как видно из рисунка, разность температур между испарителем и поверхностью конденсации довольно резко увеличивается по мере роста  $T_s$ . При повышении  $T_m$  несколько возрастает  $T_K$  из-за увеличения давления паров над испарителем. Вертикальными штрихами на кривых обозначены границы области расслоения жидкости конденсата: в левой части кривых конденсат состоит из  $^3\text{He}$  с примесью  $^4\text{He}$  ниже критической концентрации, а в правой (после второго штриха) он уже обеднен  $^3\text{He}$ .

Осуществление процесса конденсации в реальных условиях требует обеспечения конечного температурного напора и перепада давления. Поэтому точки, отвечающие температуре конденсационного насоса в рабочем процессе должны лежать ниже расчетных кривых, соответствующих необходимому  $T_m$ .

На рисунке кружочками с цифрами внутри обозначены рабочие точки для осуществленных в работе режимов (в таблице цифра соответствует номеру режима). Согласно приведенным кривым, режиму 1 должна соответствовать температура около 0,3 К или несколько ниже, режиму 2 - не ниже 0,2 К, 3 и 4 - между 0,1 и 0,2 К. Отметим, что в режиме 4 конденсат уже попадает в двухфазную об-

ласть, а для режима 5 он состоит практически только из бедной  $^3\text{He}$  фазы.

Приведенные соображения позволяют сделать заключение о решающем влиянии температуры конденсации на работу рефрижератора растворения с конденсационным насосом. В нашем рефрижераторе, как видно из рис. 2, снижение температуры общей ванны АКР на 0,1 К должно было бы привести к радикальному улучшению работы ступени растворения.

4. В заключение следует высказать небольшое замечание о пленке сверхтекучего  $^4\text{He}$  в рефрижераторе растворения с конденсационной откачкой. Это представляется тем более необходимым, что данный вопрос неточно освещается в литературе. Согласно распространенному мнению [I, IO, II], в рефрижераторе данного типа перенос  $^4\text{He}$  по пленке из испарителя в конденсационный насос отсутствует вследствие того, что испаритель является самой теплой частью ступени растворения, этот же вывод повторен в монографиях [IO, II]. Однако стенки конденсационного насоса покрыты жидкостью с концентрацией  $^3\text{He}$ , близкой к 100%, и, как следует, например из [7], осмотическое давление  $^4\text{He}$  в интервале температур 0,5 - 1,0 К на два-три порядка выше давления фонтанирования  $^4\text{He}$ , ответственного за перенос пленки на более нагретые части прибора, и почти на два порядка (уже для 30% - й смеси) выше осмотического давления 1%-го раствора. Вследствие этого перенос пленки  $^4\text{He}$  в конденсационный насос будет происходить за счет разности осмотических давлений жидких фаз в испарителе и конденсационном насосе. Наличие этого переноса, при относительно небольших величинах, скорости циркуляции

приведет лишь к незначительному изменению температуры конденсации. Тем не менее течение пленки должно учитываться при конструировании прибора введением известных мер подавления пленки и пространственным разделением зон конденсации и испарения.

Авторы благодарят сотрудников ИФП АН СССР и НПО "Гелиймаш" В.Н.Крутихина и Ю.Г.Александрова за ценные советы при конструировании и изготовлении ступени растворения рефрижератора, Е.В.Оносовского, А.Ц.Аматуни и Р.М.Отарова за внимание и интерес к работе.

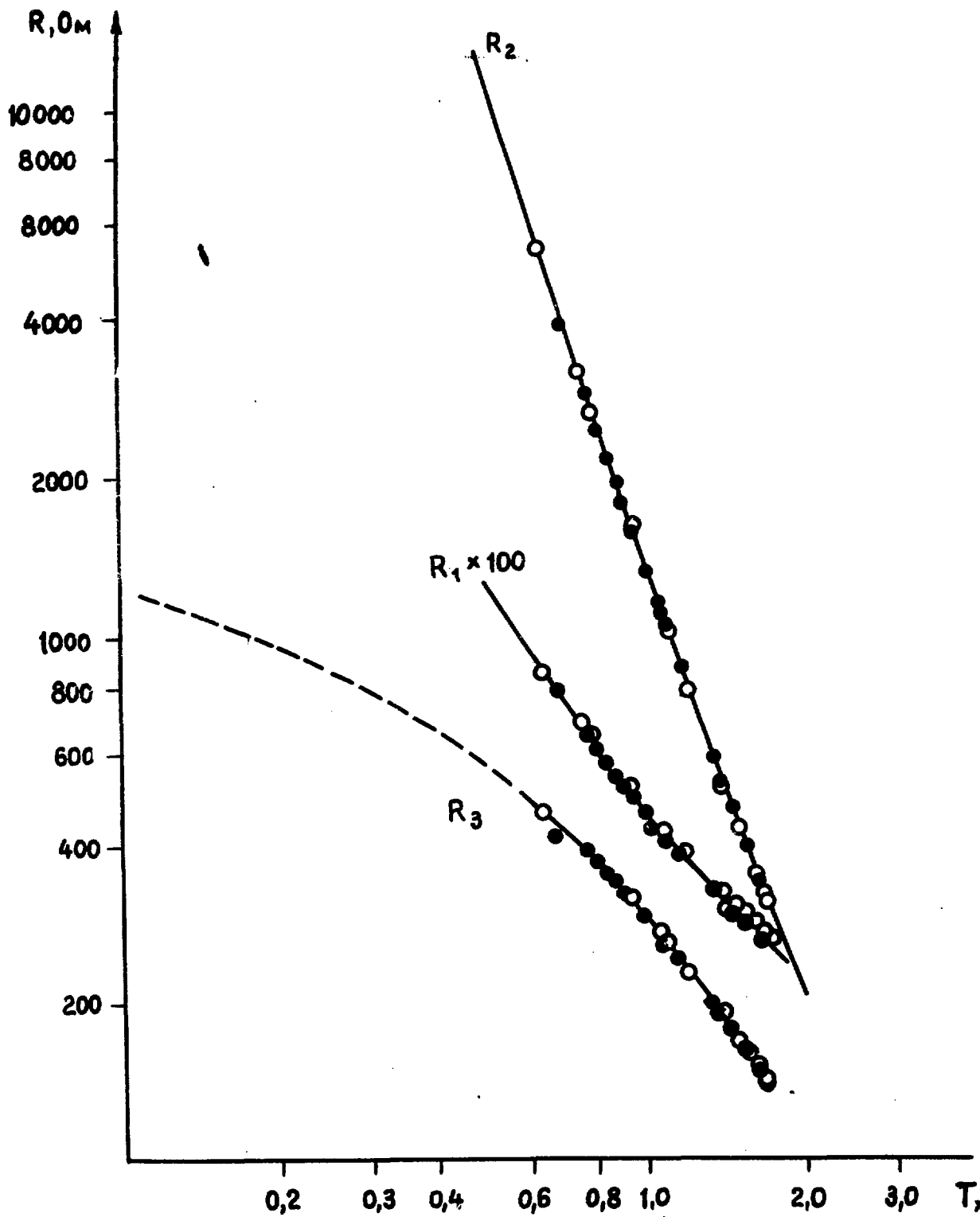


Рис. I Градуировочные кривые термометров. Разные знаки соответствуют разным дням градуировки.

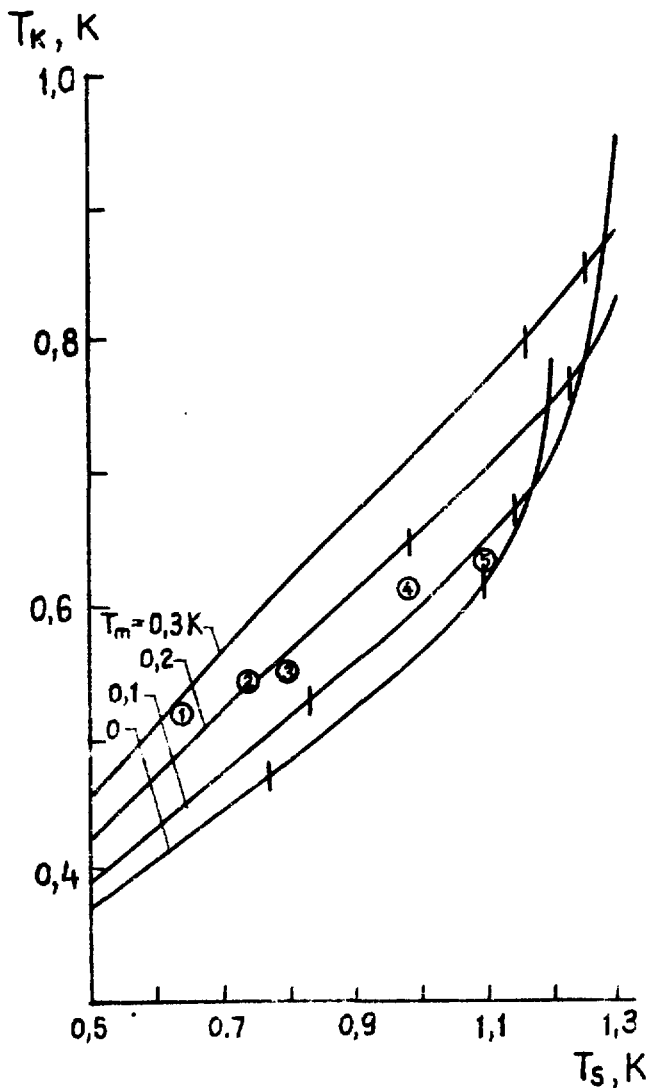


Рис. 2 Расчетные кривые зависимости максимально допустимой температуры конденсационного насоса  $T_K$  ( $= T_I$ ) от температуры испарителя  $T_S$  ( $= T_2$ ) при различных температурах ванны растворения  $T_m$  ( $= T_3$ ).

Вертикальными черточками отмечены границы области расслоения в конденсате. Кружочки с цифрами соответствуют экспериментально наблюдавшимся режимам ступени растворения (таблица).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдельман В.С. Криостат растворения с конденсационным насосом. ПТЭ, 1971, № 4, с.229-231.
2. Мина Р.Т., Ароян А.А. Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия. А.с. 966450, БИ, 1982, № 38.
3. Ароян А.А., Арутюнян М.А., Мина Р.Т. Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия без движущихся узлов. Препринт ЕФМ-749(76)-85, Ереван, 1985.
4. Михеев В.А. Способ получения сверхнизких температур. А.с. 1183055, БИ, 1984, № 26.
5. Mikheev V.A., Maidanov V.A., Mikhin N.P. Compact dilution refrigerator with a cryogenic circulation cycle of  $^3\text{He}$ , cryogenics, 1984, vol.24, N.4, p.190.
6. Зиновьева К.Н., Вайнберг В.В., Воробкало Ф.М. и др. Германиевые термометры сопротивления для сверхнизких температур. ПТЭ, 1982, т.5, с.198-200.
7. Rodebaugh, NBS Technical Note 362, 1967.
8. Sydorjak S.G., Roberts T.R. Vapor pressures of  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mixtures, Phys.Rev. 1960, N.4, p.901-912.
9. Введенский В.Л., Пешков В.П.. Давление паров смесей  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  в диапазоне температур 0,7-1,3 К, ЖЭТФ, 1972, т.63, вып.4(10), с.1363-1370.
10. Есельсон Б.Н., Григорьев В.Н., Иванцов В.Г. и др. Растворы квантовых жидкостей  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ , М.: Наука, 1973, с.395-396.
11. Лоунаσμαа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К, М.: Мир, 1977, с.77.

Рукопись поступила 12 сентября 1986 г.

А.А.АРОЯН, М.А.АРУТЮНЯН, Р.Т.МИНА,  
С.Т.БОЛДАРЕВ, В.М.МИШАЧЕВ, Р.Г.АМАМЧЯН  
РЕФРИЖЕРАТОР РАСТВОРЕНИЯ С БЕСКЛАПАННОЙ АДСОРБЦИОННОЙ  
СИСТЕМОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ  $^3\text{He}$

Редактор Л.П.Мукаля  
Технический редактор А.С.Абрамян

---

Подписано в печать 30/Х-96г. ВФ-06338      Формат 60x84/16  
Офсетная печать. Уч.изд.л.1,0              Тираж 299 экз.Ц.15р.  
Зак.тип. № 570                                  Индекс 3624

---

Отпечатано в Ереванском физическом институте  
Ереван 36, Маркаряна 2



**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**