

М 87360

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Антошук Владимир Петрович

Многорежимный рефрижератор растворения

$^3\text{He}-^4\text{He}$ с регулируемой площадью поперечного
сечения низкотемпературного теплообменника

05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем кондиционирования

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва-1993

УДК 621.59

Работа выполнена в Институте теоретической и экспериментальной физики

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Микулин Е.И.

Консультант — кандидат технических наук
Чернецкий В.Д.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Киселев М.И.
кандидат физико-математических наук
Болдарев С.Т.

Ведущая организация — —

Защита состоится 28^{го} ию
ного совета К.053.15.07
ком университете им.Н.Э

С диссертацией можно о:
сударственного техниче

Автореферат разослан '

Ученый секретарь спец
совета, кандидат техн
доцент

М 87360

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В последнее время все большее внимание привлекает область температур ниже 1 К и особенно ниже 0,3 К, так называемая зона миллиградусных температур. Исследования в этой пока еще мало освоенной области быстро расширяются, что связано с изучением фундаментальных свойств вещества, обнаружением новых и интересных свойств материи, а также с практическим использованием таких низких температур.

Основным методом получения температур ниже 0,3 К является метод растворения ^3He в ^4He , который реализуется в рефрижераторах растворения ^3He - ^4He .

К настоящему времени разработано множество типов рефрижераторов растворения (РР). Значительное место среди них занимают многорежимные РР, которые применяются для криостатирования поляризованных мишеней, радиационных и монополярных детекторов, нейтринных телескопов, гравитационных антенн и других объектов. Проблема рационального конструирования РР и минимизации потерь холодопроизводительности является актуальной задачей дальнейшего совершенствования рефрижераторов данного типа.

Значительный прогресс в решении этой проблемы может быть достигнут за счет применения в многорежимном РР низкотемпературного теплообменника (НТО) с регулируемой площадью поперечного сечения обратного канала, что обеспечивает устойчивую работу РР при значительном изменении температуры криостатирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - создание многорежимного РР с высокоэффективным НТО.

Для реализации этой цели были поставлены следующие конкретные задачи:

- теоретическое исследование оптимальных режимов РР;
- разработка методики расчета режимов РР, применимой в широком диапазоне рабочих температур;
- разработка эффективного НТО нового типа для многорежимного РР;

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1087360

Антошук В.П. Многорежимный

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

- экспериментальное исследование режимов РР и эффективности НТО;
- разработка рекомендаций по расчету многорежимного РР.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В работе проведен анализ возможных вариантов оптимизации параметров РР и определено обобщенное выражение оптимальной скорости циркуляции. Предложена математическая модель НТО, на основе которой получена система уравнений, применимая для расчета режимов РР в широком диапазоне рабочих температур.

Разработан новый тип НТО, отличающийся от известных возможностью регулирования площади поперечного сечения канала обратного потока. Экспериментальная проверка эффективности данного типа НТО показала, что применение его в многорежимном РР значительно увеличивает холодопроизводительность в высокотемпературной области рабочих температур и дает возможность практически полностью использовать производительность вакуумных насосов системы циркуляции.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. В работе предложена методика расчета многорежимных РР, которая позволяет при заданных значениях максимальной холодопроизводительности и минимальном температурном уровне криостатирования рассчитать требуемую скорость циркуляции, рационально провести выбор вакуумного оборудования системы циркуляции и определить оптимальные геометрические характеристики НТО с регулируемой площадью поперечного сечения обратного канала.

Результаты настоящей работы использовались при проектировании многорежимного РР большой мощности, создаваемого в Институте теоретической и экспериментальной физики для криостатирования протонной поляризованной мишени.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты работы докладывались на 4-м Республиканском семинаре по физике и технике сверхнизких температур (Донецк, 1989), I-й Конференции по технике низких температур (ЧССР, Кошице, 1990) и 5-м Всесоюзном семинаре по физике и технике сверхнизких температур (Алушта, 1991).

По теме диссертации опубликовано две печатные работы и имеется авторское свидетельство.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и приложения. Она содержит 83 стр. основного текста, 20 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 60 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ проведен анализ литературных данных по вопросам оптимизации и расчета РР с циркуляцией ^3He . Показано, что в известных методиках расчета оптимальных режимов обычно используются асимптотические выражения энтальпии растворения и энтальпий концентрированного и разбавленного ^3He , достаточно точные только при температурах ниже 0,06 К. В связи с чем в настоящее время нет надежных расчетных формул, применимых в широком диапазоне рабочих температур РР.

Отсутствие расчетных формул является серьезной проблемой для оптимизации многорежимных РР, диапазон рабочих температур которых достаточно широк. Многорежимные РР используются, в частности, для криостатирования поляризованных мишеней. Процесс охлаждения этих мишеней имеет режим динамической поляризации ядер (ДПЯ) и "замороженный" режим. В режиме ДПЯ в мишени выделяется тепловая мощность, которая должна поглощаться РР, работающим с максимальной холодопроизводительностью на температурном уровне 0,5 К. После того как достигнута высокая степень поляризации, мишень переводится в "замороженный" режим. В этом режиме РР должен обеспечить криостатирование мишени при температурах 0,02–0,05 К в течение нескольких десятков часов. Холодопроизводительность рефрижератора в данном режиме существенно ниже и полностью определяется теплопритоком к камере растворения.

Второй проблемой конструирования многорежимных РР является эффективная работа НТО. Требования к НТО в режиме ДПЯ и в

"замороженном" режиме существенно различны. В режиме ДПЯ, характеризующимся большой мощностью охлаждения, большой скоростью циркуляции и сравнительно высокой температурой (0,5 К), основное требование к НТО – обеспечить перенос ^3He по каналам обратного потока без больших потерь осмотического давления. В противном случае холодопроизводительность и скорость циркуляции будут ниже расчетных. В "замороженном" режиме при меньших значениях скорости циркуляции и холодопроизводительности значительная величина площади поперечного сечения обратного потока НТО, необходимая для режима ДПЯ, существенно снижает эффективность НТО из-за продольного теплового потока, что, в свою очередь, приводит к повышению предельной температуры РР.

Проведенный анализ существующих конструкций показал, что компромисс между требованиями, предъявляемыми к НТО в режиме ДПЯ и в "замороженном" режиме, может быть достигнут в теплообменнике с регулируемой площадью поперечного сечения обратного канала.

ВТОРАЯ ГЛАВА посвящена разработке теоретических основ расчета оптимальных режимов РР. Оптимизация РР возможна только при условии задания каких-нибудь двух параметров из четырех: тепловой нагрузки на камеру растворения (Q_m), температуры камеры растворения (T_m), площади поверхности НТО со стороны концентрированного потока (F_c) и скорости циркуляции (n). При этом существуют следующие варианты оптимизации:

1. $(Q_m)_{\max}$ $T_m, F_c - \text{const}, (n_{\text{opt}})_Q$;
2. $(T_m)_{\min}$ $Q_m, F_c - \text{const}, (n_{\text{opt}})_T$;
3. $(F_c)_{\min}$ $Q_m, T_m - \text{const}, (n_{\text{opt}})_F$.

Как показал проведенный в работе анализ, оптимальная скорость циркуляции (n_{opt}) имеет единственное значение, удовлетворяющее всем вариантам оптимизации (I), и определяется из уравнения

$$\frac{Q_m}{n_{\text{opt}}^2} - C_{\text{ca}}(T_{\text{co opt}}) \frac{\partial T_{\text{co opt}}}{\partial n_{\text{opt}}} = 0, \quad (2)$$

где C_{co} , T_{coopt} - теплоемкость и температура концентрированного потока на выходе НТО.

Для определения оптимальной скорости циркуляции из уравнения (2) необходимо найти производную $\partial T_{coopt} / \partial n_{opt}$, которая определяется из системы уравнений, описывающих теплофизические процессы в НТО. Аналитическое решение может быть получено только в случае непрерывно-противоточного НТО, для которого справедливы допущения:

- теплообмен между потоками определяется сопротивлением Капицы, зависимость которого от температуры - T^{-3} ;
- продольный тепловой поток и вязкие потери пренебрежимо малые.

В результате совместного решения уравнения оптимизации (2) и системы уравнений, описывающих теплофизические процессы в НТО при установившемся движении потоков, и при использовании в решении интерполяционной формулы энтальпии концентрированного потока, предложенной Т.О.Никинским

$$H_c(T_c, X_4) = \frac{b_N T_c^2}{1 + T_c/T_B}, \quad (3)$$

была получена система уравнений, определяющая оптимальные режимы РР:

$$\begin{aligned} Q_m &= \frac{F_c}{4 R_{km}} \cdot T_{coopt}^4, \\ n_{opt} &= \frac{F_c}{4 R_{km}} \cdot \frac{1}{b_N} \left(\frac{y_1(T_{coopt})}{T_{coopt}^2} - \frac{y_1(T_{ci})}{T_{ci}^2} \right)^{-1}, \\ (1 - X_4) \cdot H_d(T_m) &= 2 b_N y_2(T_{coopt}) \cdot T_{coopt}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где T_B - характеристическая температура, зависящая от концент-

рации примеси ^4He в циркулирующем газе X_4

X_4	0	0,1	0,27
T_b, K	0,4	0,5	1,0

;

T_{ci} - температура входа, концентрированного потока в НТО;

$b_m = 12 + 10 X_4$ Дж/К².моль ^3He ;

R_{sum} - суммарное значение коэффициента сопротивления Капицы;

$H_d(T_m)$ - энтальпия растворения;

$\psi_1(T), \psi_2(T)$ - безразмерные функции, зависимость которых от температуры для случая $X_4 = 0$ представлена на рис.1.

Эта система уравнений в отличие от известных применима в широком диапазоне рабочих температур РР, поскольку при ее выводе использовалась интерполяционная формула (3), достаточно точно описывающая зависимость от температуры энтальпии концентрированного потока. Основными факторами, ограничивающими применимость полученных уравнений, являются принятые допущения, влияние которых становится существенным при температурах ниже 0,02 К.

Одним из основных выводов, следующих из анализа уравнений (4), является то, что при $T_m = 0,25$ К температура выхода концентрированного потока из НТО становится равной температуре камеры испарения. В связи с этим вообще отпадает необходимость в НТО при температурах больше 0,25 К, поскольку его функцию начинает выполнять теплообменник камеры испарения. А это означает, что увеличение скорости циркуляции всегда будет приводить к увеличению холодопроизводительности подобно тому, как это происходит в криостатах с откачкой паров жидкости. Поэтому температура 0,25 К является предельной, выше которой не существует оптимальных режимов РР.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрены вопросы, связанные с созданием экспериментального многорежимного РР, дано описание его конструкции, излагается методика проведения и приводятся результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальный многорежимный РР выполнен по наиболее распространенной схеме "внешний цикл", в котором циркуляция ^3He осуществляется с помощью диффузионных и механических вакуумнасосов. В его состав входят система циркуляции, криостат и измерительный комплекс.

Система циркуляции состоит из замкнутых на криостат и последовательно соединенных диффузионного насоса НВБМ-2,5 и форвакуумного насоса НВЗ-20, вакуумной арматуры и вакуумметров. В стационарном режиме работы система циркуляции обеспечивала скорость циркуляции ^3He в диапазоне 50-1400 ммоль/с, при этом давление на входе в насос НВБМ-2,5 было в пределах 0,5-15 Па, а в линии нагнетания НВЗ-20 - 25-35 кПа.

Криостат рефрижератора включает в себя гелиевый сосуд Дьюара с объемом гелиевой полости 10 л и низкотемпературную вставку. Особенностью конструкции криостата является отсутствие градусной ванны. Необходимая для ожижения циркулирующего ^3He температура достигалась откачкой паров жидкого гелия из сосуда Дьюара.

В верхней части низкотемпературной вставки расположены газовые коммуникации контура циркуляции ^3He и регулятор НТО, в нижней - модуль растворения.

Конструкция модуля растворения с регулируемой площадью поперечного сечения обратного канала НТО в упрощенном виде представлена на рис.2. Камера испарения 2 соединена с камерой растворения 8 конусом 4, нижний конец которого находится ниже границы раздела фаз 9. В конусе 4 размещается вытеснитель 5. На боковой поверхности вытеснителя 5 имеется винтовая канавка с навитой в ней трубкой прямого потока 7. Вытеснитель 5 посредством штока 6, проходящего в откачной трубе 10, связан с вакуумноплотным регулятором НТО, расположенным на верхнем фланце низкотемпературной вставки. По трубке 1 ^3He поступает в теплообменник камеры испарения 3, который выполнен в виде пружины, благодаря чему с помощью регулятора НТО можно осуществлять перемещения вытеснителя 5 в направлениях, указанных стрелкой.

Такие элементы модуля растворения, как конус 4, вытеснитель 5 и трубка прямого потока 7, составляют конструкцию НТО.

При опущенном штоке 6 вытеснитель 5 плотно прижат к конусу 4, и обратный поток ³Не из камеры растворения 3 проходит по свободному пространству винтовой канавки, охлаждая при этом трубку прямого потока 7 аналогично тому, как это осуществляется в теплообменниках типа "труба в трубе". При приподнятом вытеснителе 5 между ним и конусом 4 образуется зазор, увеличивающий площадь поперечного сечения обратного канала. В этом случае теплообмен осуществляется как в теплообменниках "кольцевого" (поперечноточного) типа.

В разработанном НТО с регулируемой площадью поперечного сечения обратного потока площадь теплообмена со стороны концентрированного (прямого) потока составляла 18 см², со стороны разбавленного (обратного) – 29,8 см². Зазор между вытеснителем и конусом δ , а также средняя площадь поперечного сечения Ad_{cp} и гидродинамическое сопротивление обратного канала Z_d в зависимости от высоты подъема вытеснителя h приведены в таблице:

h , мм	0	1	2	3	4	5	6
δ , мм	0	0,035	0,07	0,105	0,14	0,175	0,21
Ad_{cp} , мм ²	1,5	14,8	29,6	44,5	59,3	74,1	88,9
$Z_d \cdot 10^{-12}$, м ⁻³	42,46	20,65	9,28	4,36	2,63	1,54	0,91

Основными измерениями при проведении экспериментов являлись измерения тепловой нагрузки на камеру растворения, скорости циркуляции, высоты подъема вытеснителя, температур в камерах испарения и растворения. Кроме этого проводились измерения и контроль температуры конденсатора, тепловой нагрузки на камеру испарения и давления в различных точках системы циркуляции.

В эксперименте были получены рабочие характеристики РР при различных значениях площади поперечного сечения обратного канала НТО и определена область оптимальных режимов.

Каждая точка кривой оптимальных режимов определялась как экстремум из экспериментально полученных зависимостей вида

$$T_m = f(n) \quad \text{при} \quad Q_m, h - \text{const.} \quad (5)$$

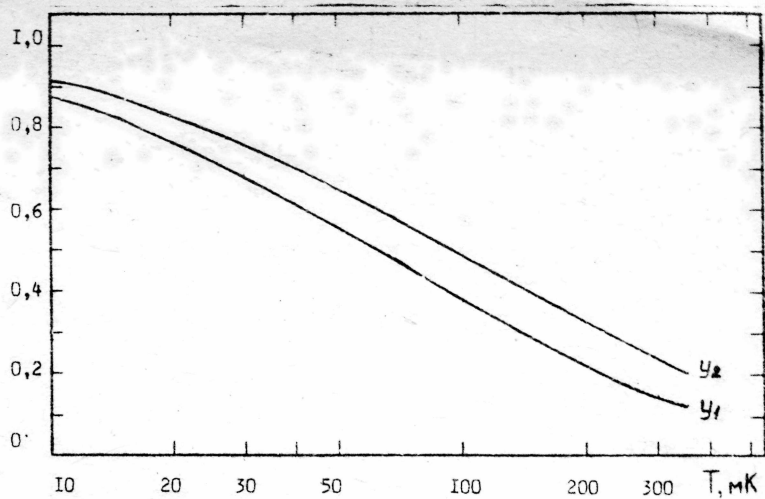


Рис. 1. Зависимость функций U_1 и U_2 от температуры.

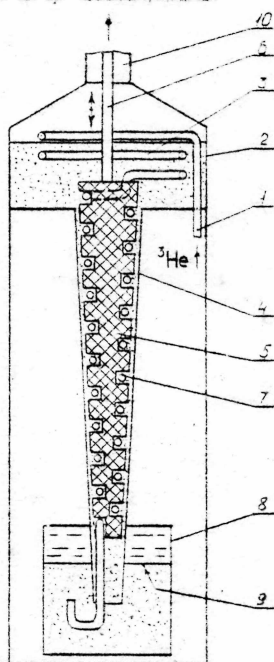


Рис. 2. Модуль растворения экспериментального многорежимного РР.

Исследования оптимальных режимов проводились при скоростях циркуляции, реализуемых в рефрижераторе при вариации температуры камеры испарения в диапазоне 0,52–0,85 К. Скорости циркуляции, соответствующие температурам камеры испарения 0,52 и 0,85 К, определяли границы оптимальных режимов, за пределами которых исследования проводились при постоянном значении температуры камеры испарения (0,52 либо 0,85 К). При этом фиксировалась величина подводимой тепловой мощности к камере растворения Q_m , а измерялись ее температура T_m и скорость циркуляции n при различных значениях высоты подъема вытеснителя h .

Было установлено, что область оптимальных режимов экспериментального РР располагается в пределах значений температуры камеры растворения 0,1–0,04 К.

Полученные результаты экспериментального исследования представлены в координатах $Q_m - T_m$ и $n - T_m$ (рис.3 и рис.4). На рисунках не представлены данные при $h = 3, 4, 5$ мм, поскольку они имеют промежуточные значения и не дают никакой дополнительной информации.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ проведен анализ теоретических и экспериментальных результатов и изложена методика расчета многоорежимного РР с регулируемой площадью поперечного сечения обратного потока НТО.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных в области температур 0,1–0,04 К показало, что уравнения (4) адекватно описывают оптимальные режимы РР. Однако при увеличении площади поперечного сечения обратного потока НТО прослеживается отклонение экспериментальных данных от расчетных в сторону снижения холодопроизводительности особенно в области низких температур. Причем, чем больше площадь, тем больше отклонение. Это снижение холодопроизводительности обусловлено главным образом увеличением продольного теплового потока по обратному каналу НТО и снижением его эффективности. Увеличение площади попереч-

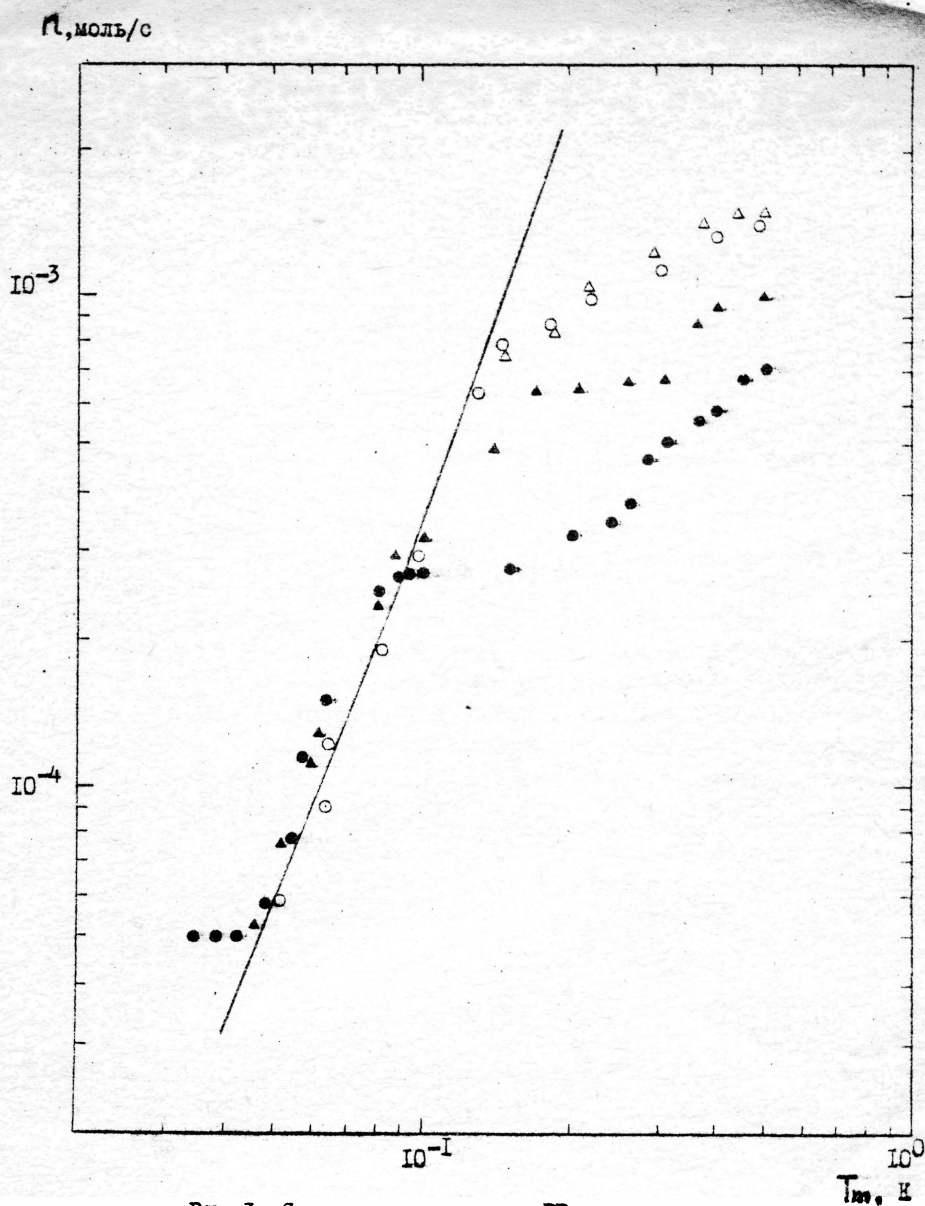


Рис.3. Скорость циркуляции ФР.

— - расчет, ● $h=0$ мм, ▲ $h=1$ мм, ○ $h=2$ мм, △ $h=6$ мм.

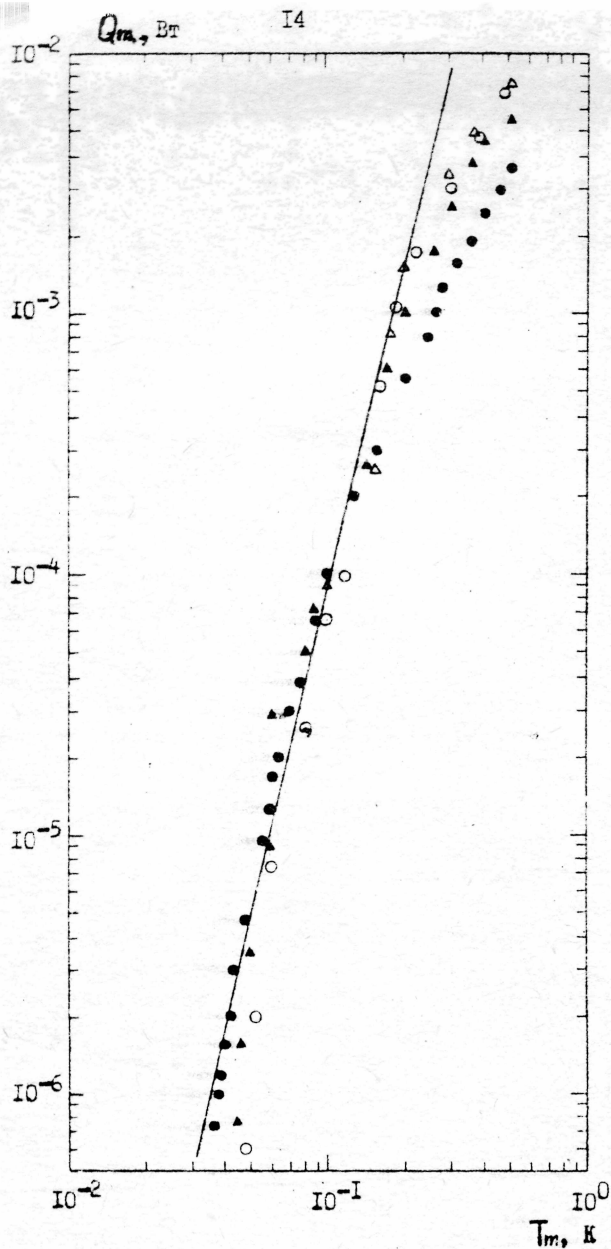


Рис. 4. Холодопроизводительность РР.

— расчет, $\bullet$ $h=0\text{мм}$, $\blacktriangle$ $h=1\text{мм}$, $\circ$ $h=2\text{мм}$, $\triangle$ $h=6\text{мм}$

ного сечения приводило не только к снижению холодопроизводительности, но и к повышению предельно-достижимой температуры РР вплоть до возникновения конвекции в канале обратного потока, вызывающей сильные незатухающие температурные колебания в камере растворения. Предельные температуры в зависимости от высоты подъема вытеснителя составляли:

h , мм	0	1	2	3	4	5	6	7
$(T_m)_{lim}, \text{мК}$	33	39	43	49	56	67	160 конвекция	200 конвекция

В температурном диапазоне 0,1–0,5 К увеличение площади поперечного сечения обратного канала НТО приводило к увеличению скорости циркуляции и, соответственно, холодопроизводительности. Такое поведение зависимости скорости циркуляции от площади поперечного сечения канала НТО обусловлено уменьшением потерь осмотического давления в канале обратного потока. При поднятии вытеснителя на высоту 1 мм и 2 мм скорость циркуляции и холодопроизводительность увеличивались на 50%. При дальнейшем подъеме вытеснителя наблюдался незначительный рост этих параметров. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало также, что при температуре криостатирования 0,5 К основное требование к НТО – обеспечить перенос ^3He по каналу обратного потока без больших потерь осмотического давления, а площадь поверхности НТО при этой температуре не оказывает существенного влияния на холодопроизводительность РР.

На основе экспериментальных данных для температурного уровня 0,5 К получено уравнение, связывающее гидродинамическое сопротивление канала обратного потока со скоростью циркуляции, при которой холодопроизводительность РР максимальна

$$(Zn)_{0,5\text{K}} = 1,26 \cdot 10^8 \text{ моль/с} \cdot \text{м}^3. \quad (6)$$

Данное уравнение позволяет, после определения требуемой скорости циркуляции при расчете режима ДНТ, определить необходимую

площадь поперечного сечения обратного канала НТО.

В заключительном разделе главы изложена методика расчета многорежимных РР с регулируемой площадью поперечного сечения обратного потока НТО, позволяющая определить основные параметры рабочих режимов и геометрические характеристики НТО.

ВЫВОДЫ

1. Проведено теоретическое исследование оптимальных режимов РР. Получено обобщенное выражение, определяющее оптимальную скорость циркуляции, которой соответствует минимальная величина площади поверхности НТО, обеспечивающая максимальную холодопроизводительность рефрижератора и минимальную температуру камеры растворения.

2. Разработана математическая модель НТО, на основе которой получены выражения для расчета оптимальных режимов РР, применимые в широком диапазоне рабочих температур. Удовлетворительное согласие опытных данных с результатами расчета подтверждает адекватность разработанной математической модели.

3. Предложен и разработан новый тип НТО с регулируемой площадью поперечного сечения канала разбавленного потока ^3He , обеспечивающий многорежимность РР. Экспериментальные исследования эффективности данного типа НТО показали, что применение его в многорежимном РР значительно увеличивает холодопроизводительность в высокотемпературной области и обеспечивает оптимальные режимы в широком диапазоне рабочих температур.

4. На основании экспериментальных исследований многорежимного РР установлено:

- в области высоких рабочих температур основное требование к НТО состоит в том, чтобы обеспечить перенос ^3He по каналу разбавленного потока с наименьшими потерями осмотического давления. Величина площади поперечного сечения канала в этой области должна быть максимальна, но ограни-

чивается эффектом конвекции, возникающем в канале;

- в низкотемпературной области продольный тепловой поток в НТО существенно влияет на параметры РР. Неоптимальный выбор площади поперечного сечения канала разбавленного потока приводит к снижению предельной температуры.

5. Найдена эмпирическая зависимость, определяющая площадь поперечного сечения канала разбавленного потока для температур криостатирования 0,5 К, при которой достигаются максимальные значения холодопроизводительности и скорости циркуляции.

6. В результате проведенной работы предложена методика расчета многорежимного РР, которая позволяет при заданных значениях максимальной холодопроизводительности и минимального уровня криостатирования рассчитать требуемую скорость циркуляции, рационально провести выбор вакуумного оборудования системы циркуляции и определить оптимальные геометрические характеристики НТО с регулируемой площадью поперечного сечения канала разбавленного потока.

7. Результаты работы были использованы при проектировании многорежимного РР большой мощности для криостатирования протонной поляризованной мишени, создаваемого в Институте теоретической и экспериментальной физики.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Антошук В.П. Оптимизация параметров рефрижератора растворения // Сборник научных докладов 4-го Республиканского семинара по физике и технике сверхнизких температур. - Донецк, 13-19 мая 1989, стр.32-33.

2. Антошук В.П. Оптимизация параметров рефрижератора растворения ^3He - ^4He . - М., 1991, - Препринт ИТЭФ 78-91, - 21с.

3. А.С.1625162 (СССР). Устройство для получения низких температур/ИТЭФ; Авт.изобрет.В.П.Антошук, - Заявл.03.II.88, № 4618236/23-03.

1

Подписано к печати 15.04.93 Формат 60х90 1/16 Офсетн.печ.
Усл.-печ.л.1,25. Уч.-изд.л.0,9. Тираж 100 экз. Заказ 411

Отпечатано в ИТЭФ, П7259, Москва, Б.Черемушкинская,25