

Автореферат
С 90

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

На правах рукописи
~~Для служебного пользования~~
Экз. № _____

СУРЬЯНИНОВА Нина Николаевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ МИКРОКРИОГЕННОЙ
СИСТЕМЫ НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ КРИОАГЕНТЕ НА УРОВЕНЬ
ОХЛАЖДЕНИЯ 120 К

Специальность 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 учёной степени
кандидата технических наук

xv 1008

Институт холода
ОНАХТ
бібліотека

М.С.

Одесса - 1994

Одесская государственная академия холода

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Н.Д.Захаров
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Г.К.Лавренченко
- кандидат технических наук
А.В.Мостицкий
- Ведущее предприятие - ЦНПО "ЭНЕРГИЯ", г.Москва

Защита состоится "22" 06 1994 года в 11 час
на заседании специализированного Совета К.063.27.01 в Одесской
государственной академии холода по адресу:
270057, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ОГАХ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Автореферат разослан "___" _____ 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для охлаждения опто- и радиоэлектронной аппаратуры широкое применение находят дроссельные микрокриогенные системы (ДМКС), обладающие целым рядом функциональных преимуществ. Использование по предложению В.М.Еродянского, А.К.Грезина, Э.А.Громова смесей в качестве рабочих тел таких систем позволило радикально улучшить их энергетические и массогабаритные характеристики и по сути открыло новое направление в развитии микрокриогенной техники. Значительный вклад в разработку ДМКС на смесях внесли Г.К.Лавренченко, М.Ю.Боярский, А.Д.Суслов, Н.Д.Захаров, Л.Г.Абакумов, В.Г.Деньгин, Ю.И.Ланда и др.

Однако, в связи с прогрессом в физике низких температур продолжают возникать новые задачи, выходящие за рамки накопленного опыта. К их числу относится создание ДМКС с температурой криостатирования 120 К и ресурсом работы 5-10 тыс. часов, предназначенных для охлаждения квантоскопов, ИК-приёмников, ВТСИ-устройств и других объектов.

В ИГТУ им.Баумана разработан и исследован экспериментальный образец такой ДМКС на базе двухступенчатого смазываемого компрессора. В качестве хладагента использована азотно-углекислотная смесь. Попытки применить высококачественные компрессоры со смазкой цилиндров в ДМКС, работающих на пожаро- и взрывобезопасных азотно-хладонных смесях, предпринятые в НИО "Сибкриотехника" и других организациях, к успеху не привели вследствие незначительной растворимости масел в жидких хладонах при низких температурах, вынуждающей использовать громоздкие устройства для очистки хладагента.

Из существующих несмазываемых конструкций указанному выше требованию к ресурсу работы отвечают микрокомпрессоры с линейным возвратно-поступательным приводом. К ним, в частности, относится электродинамический компрессор (ЭДК) с щелевым уплотнением и шариковыми направляющими поршня. В НИИ "Шторм" в 80 - 90-ые годы созданы образцы одноступенчатых ЭДК для систем, работающих по модифицированному циклу Гиффорда-МакМагона, который, как известно, характеризуется сравнительно низкими энергетическими показателями.

Цель данного исследования состоит в разработке экологически чистого, пожаро- и взрывобезопасного многокомпонентного хладагента, обеспечивающего в дроссельном цикле с одноступенчатым сжатием высокую термодинамическую эффективность, и создание с его использованием ДМКС на базе электродинамического компрессора.

Основные задачи работы сформулированы следующим образом:

1. Развитие методики расчёта и оптимизации дроссельных циклов на многокомпонентных рабочих телах (МРТ), повышение эффективности вычислительных алгоритмов и программ.

2. Проведение расчётно-теоретических исследований с целью определения оптимального состава МРТ и параметров дроссельного цикла.

3. Разработка и экспериментальное исследование макета ДМКС с целью проверки и корректировки теоретических положений и рекомендаций.

4. Создание и испытание экспериментального образца ДМКС на базе электродинамического компрессора.

Научная новизна.

Научную новизну работы определяют следующие результаты:

1. Усовершенствована методика расчётно-теоретической оптимизации дроссельного цикла на многокомпонентном рабочем теле в части выбора независимых переменных, процедуры локализации экстремума целевой функции и алгоритма расчёта парожидкостного равновесия в прямом и обратном потоках.

2. Обоснован выбор компонентов для формирования МРТ, отвечающего поставленной цели работы, исследовано влияние их числа на эксергетический КПД дроссельного цикла, осуществлена оптимизация состава трёхкомпонентного криоагента Ar-R14-R218 и показано, что его применение открывает возможности создания высокоэффективных ДМКС с температурой охлаждения 120 К на базе одноступенчатых компрессоров рецептура криоагента защищена положительным решением по заявке на авторское свидетельство.

3. Получены экспериментальные характеристики дроссельных микроохладителей на МРТ оптимального состава.

Практическая ценность работы.

1. Научные результаты и технические решения положены в основу разработки и изготовления опытного образца ДМКС на 120 К с полезной холодопроизводительностью 32 Вт на базе одноступенчатого ЭДК с линейным приводом. Испытания в составе с макетом квантоскопа показали, что он в состоянии конкурировать с наиболее совершенными микрокриогенными системами.

2. Расчётные методики, полученные экспериментальные данные и рекомендации могут быть использованы в дальнейших разработках ДМКС на МРТ.

Результаты работы внедрены предприятием ЦПО "Комета" г. Москва в НИР по созданию систем криостатирования повышенного ресурса и НИИРП г. Москва в ОКР по созданию систем криостатирования ЭЛП-квантоскопов.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции "Криогеника-91" г. Москва, 1991г. и 53-й научно-технической конференции преподавателей и сотрудников ОТИШ им. М. В. Ломоносова г. Одесса, 1993г.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них: 1 положительное решение ВНИИПИ о выдаче патента, 3 статьи, 2 тезисов докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 83 наименований и приложений. Работа изложена на 121 страницах машинописного текста, включая 22 рисунка и 20 таблиц.

Автор выносит на защиту:

1. Методик оптимизации дроссельного цикла на МРТ, усовершенствованную в части процедуры локализации экстремума целевой функции и алгоритма расчёта парожидкостного равновесия.

2. Результаты оптимизационных расчётов дроссельного цикла на МРТ с одноступенчатым сжатием и температурой криостатирования 120 К.

3. Результаты экспериментальных исследований характеристик ДМКС на многокомпонентном криоагенте.

4. Принятые технические решения и результаты испытаний опытного образца ДМКС на базе одноступенчатого электродинамического компрессора с тепловым макетом квантоскопа.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулирована цель работы, выбраны пути её достижения, описаны основные результаты с указанием научной новизны, показана научная и практическая значимость выполненного исследования.

В первой главе рассмотрены существующие методики оптимизации дроссельного цикла на МРТ, отмечены их недостатки и определены направления дальнейшего совершенствования. Приведено подробное описание алгоритма оптимизации параметров, содержащего оригинальную процедуру

локализации экстремума целевой функции эксергетического КПД цикла в пространстве независимых переменных, в качестве которых выбраны концентрации компонентов в жидкой фазе обратного потока на входе в теплообменник. Поиск максимума КПД осуществляется подпрограммой, реализующей модифицированный метод Хука-Дживса. Он предусматривает исследование локального поведения целевой функции, на основе которого организуется продвижение к экстремуму по кратчайшему пути.

Процедура поиска максимума КПД включает:

- определение границ области варьирования концентраций компонентов в жидкой фазе обратного потока на уровне криостатирования, с учётом данных по равновесию жидкость-пар и жидкость-кристалл;

- выбор исходной точки внутри области варьирования переменных и расчёт эксергетического КПД цикла с проверкой возможности регенерации холода в промежуточных сечениях теплообменника;

- исследование топографии функции отклика в окрестности исходной точки с вычислением приращений КПД $\Delta \eta_{ex}$ в разных направлениях;

- продвижение к максимуму КПД по кратчайшему пути посредством придания переменным приращений $\Delta x_{i,k+1} = \frac{\Delta \eta_{ex}}{|\Delta \eta_{ex}|} \Delta x_{i,k}$, где индексы K и K+1 относятся к двум последовательным шагам.

Проверка возможности регенерации холода на промежуточных температурных уровнях осуществляется посредством анализа диаграммы T-i. Расчёту энтальпий потоков предшествует решение наиболее сложной задачи парожидкостного равновесия, включающее:

- определение разности фугитивностей компонентов в жидкости f_i' и паре f_i'' по предварительно выбранным составам;

- итерационное уточнение концентраций компонентов в фазах с использованием соотношений, полученных в предположении постоянства активности на данном шаге:

$$\Delta g = - \frac{\sum \Delta f_i / B_i}{\sum A_i / B_i}; \Delta x_i = \frac{\Delta f_i}{B_i} + \frac{A_i}{B_i} \Delta g; y_i = \frac{z_i - g x_i}{1 - g};$$

где $B_i = \frac{f_i'}{x_i} + \frac{f_i''}{y_i} \cdot \frac{g}{1-g}$; $A_i = \frac{f_i''}{y_i} \cdot \frac{z_i - x_i}{(1-g)^2}$;
g - доля жидкости; z_i - валовый состав.

Для расчёта термодинамических свойств МРТ в процессе оптимизации их состава использовано модифицированное уравнение состояния Редлиха-Квонга

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b)}$$

со следующими правилами определения и комбинирования индивидуальных параметров:

$$b_i = 0,0867 \frac{RT_{pc}}{P_{pc}}; a_i = K_{oi} - K_{ii} \cdot T^{0,5}; b = \sum b_i z_i;$$

$$a = \sum \sum z_i z_j a_{ij}; a_{ij} = \theta_{ij} (a_i a_j)^{0,5}$$

Значения констант K_{oi} и K_{ii} подобраны так, чтобы кроме критических условий удовлетворялось правило Максвелла вдоль кривой упругости компонента при табличных значениях давления насыщения.

Значения параметра θ_{ij} , характеризующего специфику межмолекулярных парных разнородных взаимодействий, определены по имеющимся в литературе данным о фазовом равновесии в бинарных смесях.

Исследование уравнения Редлиха-Квонга применительно к описанию calorических свойств смесей показало, что отклонения расчётных значений изотермического изменения энтальпии смесей от экспериментальных на уровне температуры окружающей среды при умеренных давлениях не превышает 1 кДж/кг. Для жидких смесей в области низких температур отклонения могут достигать 5 кДж/кг. Поэтому полученные на основе уравнения Редлиха-Квонга расчётные данные по оптимальному составу МРТ нуждаются в экспериментальной проверке.

Вторая глава посвящена вопросу термодинамического анализа и сравнения дроссельных циклов с учётом их энергетической эффективности, простоты технической реализации и надёжности работы ДМКС. Показано, что цикл Линде на МРТ с температурой криостатирования 120 К превосходит цикл с двойным дросселированием и предварительным охлаждением прямого потока.

Эффективность МРТ прежде всего определяется их качественным составом. При формировании МРТ для цикла с одноступенчатым сжатием базовый компонент при требуемой температуре криостатирования должен иметь давление насыщения не ниже 3 - 4 бар, что обеспечивает приемлемые значения дроссель-эффекта. Количество и температуры кипения выходящих компонентов следует подбирать так, чтобы регенерация холода в цикле проходила с небольшими разностями температур по всей длине регенеративного теплообменника.

В таблице I с учётом изложенного приведены вещества, которые можно использовать для разработки смесей на уровень криостатирования 120 К. Из них наибольший интерес представляют азот, аргон и пожаро- и взрывобезопасные хладоны.

Таблица I
Перечень веществ, пригодных для формирования МРТ

Базовый компонент	Высококипящий компонент	Промежуточные компоненты
азот, кислород, аргон, метан	n-бутан, бутен-1, изобутан, R12, R22, R218, перфтор-2 - метилпентан	пропан, пропилен, этан, этилен, метан, R13, R14, R23

В настоящее время, в связи с принятием Монреальской конвенции, большое значение приобретает озонобезопасность веществ, применяемых в составе МРТ. С этой точки зрения идеальными компонентами являются R14 и R218. Существенным преимуществом указанных хладонов является также то, что они выпускаются для нужд криогенной техники с высокой степенью очистки от кристаллизующихся примесей (H_2O , CO_2 и др.).

По техническим условиям давление обратного потока в создаваемой ДМКС на базе разработанного в ИИИ "Шторм" одноступенчатого компрессора с линейным приводом ограничивается величиной 6...7 бар. Такое давление может быть обеспечено применением в качестве базового компонента МРТ азота или аргона, которые при температуре 120 К имеют значения давления насыщения соответственно 25 и 12,1 бар.

Как показали расчёты, КПД цикла на бинарных смесях Ar - R13 и N2 - R13 при давлении обратного потока 6,5 бар отличаются мало (соответственно 17,8% и 19,3%). В этих условиях решающее значение приобретает стабильность температуры криостатирования при воздействии возмущающих факторов.

На температуру криостатирования влияют внешние условия эксплуатации ДМКС, вызываемое износом падение производительности компрессора и другие факторы, приводящие к изменению давления потоков и холодопроизводительности системы. Интенсивность этого влияния определяется крутизной зависимости температуры кипения жидкой фазы за дросселем от давления и состава. В этом отношении аргон, как базовый компонент, имеет существенные преимущества по сравнению с азотом.

Таким образом, перспективным криоагентом для ДМКС с рабочей температурой 120 К с учётом термодинамических, технических и эксплуа-

тационных требований и ограничений можно считать трёхкомпонентную смесь Ar - R14 - R218.

Оптимизация дроссельного цикла на МРТ проведена при следующих условиях:

- температура криостатирования $T_p = 120$ К;
- температура окружающей среды $T_0 = 300$ К;
- разность температур на холодном конце теплообменника $\Delta T_c = 2$ К;
- разность температур на тёплом конце теплообменника $\Delta T_t = 5$ К;
- минимально допускаемая разность температур в промежуточных сечениях теплообменника $\Delta T_{min} = 5$ К;
- отношение распределённой по высоте теплообменника нагрузки к сосредоточенной на уровне криостатирования $m = 0,3$.

Варьировались количество компонентов (от 2 до 4) и отношение давлений в цикле ($G = 3; 5; 10$). Результаты расчётов приведены на рис.1 - 3. Их анализ показывает, что увеличение количества компонентов приводит к росту эксергетического КПД цикла, который, однако, прогрессивно замедляется с каждым новым компонентом. Учитывая, что при этом усложняется технология приготовления МРТ, можно ограничиться применением трёхкомпонентного криоагента Ar - R14 - R218.

Расчёты, проведенные при фиксированной концентрации аргона в жидкости на уровне криостатирования $X1 = 0,5$ и различных соотношениях концентраций хладонов R14 и R218 $X2/X3$, показывают, что существует оптимальное значение $X2/X3$, равное 0,4 (рис.2).

Оптимальная концентрация аргона в жидкости $X1$, соответствующая этому значению $X2/X3$, находится в диапазоне 0,4 - 0,5 мол. доли (рис.3).

Глобальному максимуму эксергетического КПД цикла соответствуют следующие параметры:

- состав МРТ в мол.долях : аргон - 0,51; хладон I4 - 0,14; хладон 218 - 0,35;
- давление прямого потока, $P_n = 32,5$ бар;
- давление обратного потока, $P_c = 6,5$ бар;
- удельная холодопроизводительность, $q_0 = 734$ Дж/моль;
- эксергетический КПД цикла, $\eta_e = 29,8\%$.

На рис.4 приведена $T - i$ диаграмма цикла, которая подтверждает возможность регенерации холода на всех температурных уровнях.

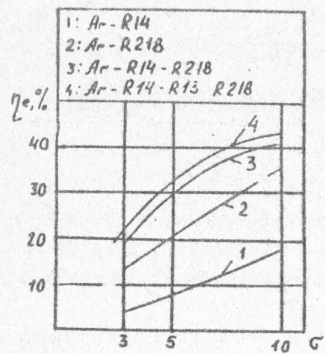


Рис. 1

Эксергетический КПД цикла в зависимости от степени сжатия и состава МРТ

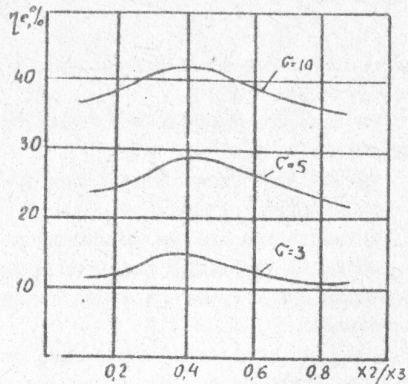


Рис. 2

Эксергетический КПД цикла в зависимости от степени сжатия и отношения концентраций хладонов R14 и R218 в жидкой фазе при концентрации аргона 0,5

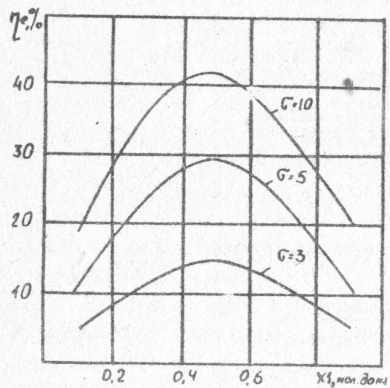


Рис. 3

Эксергетический КПД цикла в зависимости от степени сжатия и концентраций аргона в жидкой фазе при отношении концентраций хладонов R14 и R218 0,4

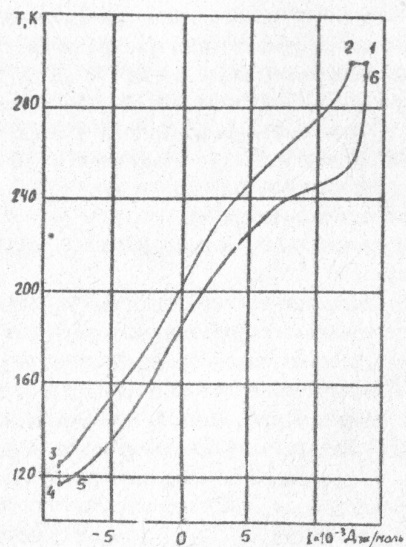


Рис. 4

Дроссельный цикл на МРТ Ar-R14-R218 оптимального состава в 1-й диаграмме

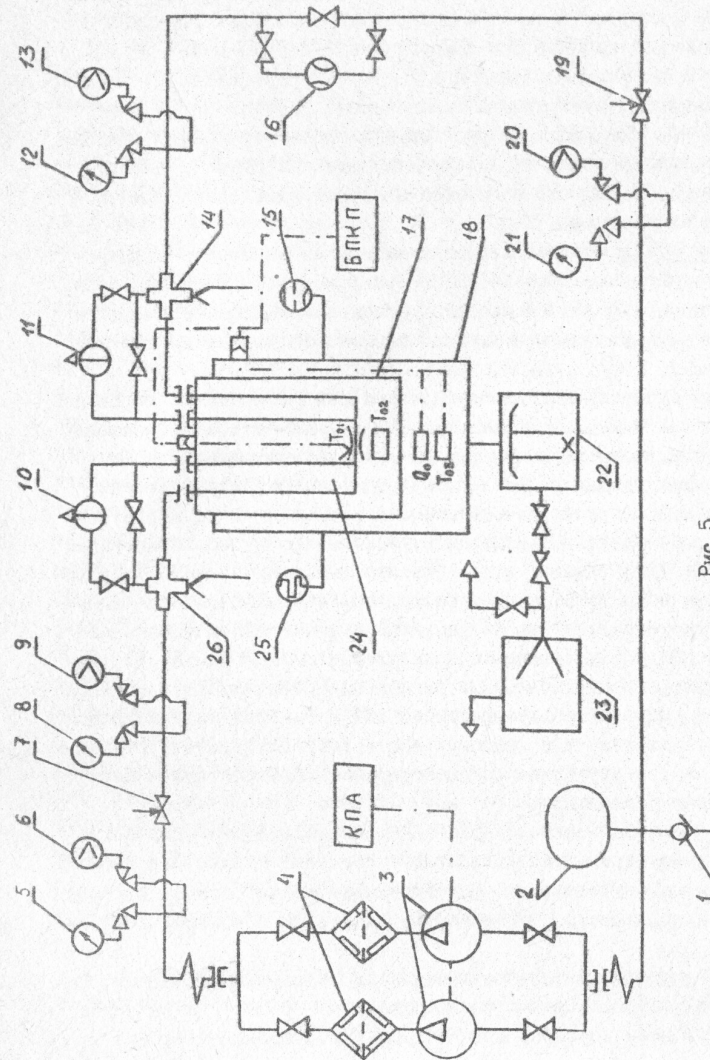


Рис. 5
Принципиальная схема экспериментального стенда

Таким образом, при использовании трёхкомпонентного хладагента $A_2 - R14 - R218$ эксергетический КПД простого дроссельного цикла с отношением давлений потоков $G = 5$ достигает 30%, что в 4 - 7 раз превышает показатели цикла Линде и в 1,4 - 2,3 раза цикла с двойным дросселированием и промежуточным охлаждением, работающих на азоте или аргоне. Столь значительный рост эффективности открывает принципиальную возможность создания конкурентоспособных ДМКС с одноступенчатым сжатием, в том числе на базе электродинамических компрессоров с линейным приводом.

В третьей главе представлены результаты разработки и экспериментального исследования макета ДМКС, целью которого являлась проверка адекватности расчётной модели дроссельного цикла на смесях и подтверждение или уточнение рекомендаций по оптимальному составу МРТ.

Критерием адекватности является совпадение в пределах вероятной погрешности расчётных и экспериментальных данных по холодопроизводительности дроссельного цикла на уровне криостатирования. При этом экспериментальная величина холодопроизводительности определяется активной тепловой нагрузкой мощностью нагревателя и теплопритоками в зону микроохладителя, расположенную ниже среза теплообменника. Последние могут быть оценены с применением комбинированного экспериментально-расчётного метода, предусматривающего нахождение по опытным данным суммарной величины теплопритоков из энергетического баланса цикла и последующее расчётное выделение из неё части, относимой к низкотемпературной зоне. Для уменьшения погрешности, вносимой расчётами, при разработке экспериментальной установки минимизировалась относительная величина теплопритоков, сосредоточенных на уровне криостатирования, посредством соответствующего выбора типоразмера и конструкции микроохладителя.

Для экспериментального исследования был создан универсальный стенд, позволяющий проводить комплексное изучение параметров дроссельного цикла замкнутого типа. Конструктивно стенд состоит из трёх взаимосвязанных систем: пневматической, вакуумной и контрольно-измерительной.

В пневматической системе осуществляются следующие процессы. Рабочая смесь сжимается в блоках пневмопитания 3 (рис.5), в качестве которых использованы серийные изделия КВО.1545, проходит через

фильтр 4 и через регулируемый вентиль 7 поступает в линию высокого давления микроохладителя 24. Измерение давления МРТ осуществляется с помощью преобразователей давления типа Сапфир-22, показания которых фиксируются самописцами КСП. Чувствительным элементом преобразователя является пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми плёночными тензорезисторами (поз. 5,3,12 и 21 на схеме). Для оперативного контроля и регулирования давления прямого и обратного потоков рядом с преобразователями давления типа Сапфир-22 установлены образцовые манометры (поз. 6,9,13 и 20 на схеме). Измерение падения давления в линиях прямого и обратного потоков МРТ в микроохладителе осуществляется с помощью дифференциальных преобразователей давления типа Сапфир-22 (поз. 10 и 11 на схеме), подключённых к коллекторам 26 и 14, установленным на фланце микроохладителя. Температуры МРТ на входе и выходе из микроохладителя, перед дросселем (T_{01}) и за ним (T_{02}) измеряются с помощью термопар (термопары для измерения температур T_{01} и T_{02} в конструкции микроохладителя вводятся между 1-ми и 2-ми рядами капиллярных трубочек, навитых на сердечник), а температура криостатирования (T_{03}) - полупроводниковым датчиком температуры, размещённым на наружной поверхности гильзы 17. Вторичными приборами служат прибор универсальный УИШ-60М и прибор комбинированный цифровой Ц-300. Полезную нагрузку имитирует нагреватель Q_0 , подключённый к источнику постоянного тока Б5-44. Для измерения расхода МРТ в стенде использован струйный автотензорный датчик расхода 16 с пределом относительной погрешности - 2,5%. Используемые в стенде контрольно-измерительные приборы позволяют определять холодопроизводительность с погрешностью не более 36,7 Дж/моль.

Разработан и изготовлен также стенд для приготовления МРТ и контроля его состава методами газовой хроматографии.

Последовательность проведения экспериментов состояла в следующем:

- устанавливался режим работы ДМКС с близкими к номинальным значениями давления всасывания, давления нагнетания и расхода хладагента;
- после стабилизации параметров без подвода внешней нагрузки измерялась недокуперация, что позволяло определить величину теплопритоков;
- подавалось напряжение на нагреватель и увеличивалась мощность до достижения номинального значения температуры криостатирования;

-в установившемся режиме измерялись все остальные параметры. Испытания проводились на бинарном МРТ Ar-R13 (0,56 мол.доли Ar) и на тройном МРТ Ar-R14-R218 (0,513; 0,140; 0,347 мол.доли) с использованием 2-х типов конструкций микроохладителей: с регулируемым и нерегулируемым дросселем.

Результаты испытаний дроссельного микроохладителя на тройном МРТ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование параметра, единицы измерения	I режим		II режим
	эксперимент	эксперимент	расчёт
1. Давление прямого потока, МПа	3,3	3,3	3,25
2. Давление обратного потока, МПа	0,65	0,65	0,65
3. Температура прямого потока на входе в микроохладитель, К	295	295	295
4. Температура перед дросселем, К	121,5	122	122
5. Температура за дросселем, К	117	117,3	-
6. Температура криостатирования, К	-	120	120
7. Температура обратного потока на выходе из микроохладителя, К	284,1	289	290
8. Потери по прямому потоку, МПа	$0,19 \cdot 10^{-1}$	$0,19 \cdot 10^{-1}$	$0,20 \cdot 10^{-1}$
9. Потери по обратному потоку, МПа	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$
10. Расход МРТ, 10^4 кг/с	2,5	2,5	2,5
11. Напряжение на нагревателе, В	0	10	-
12. Сила тока через нагреватель, А	0	0,16	-
13. Мощность нагревателя (расчётная холодопроизводительность), Вт	0	1,6	2

Экспериментальная холодопроизводительность составила $q_0 = 705$ Дж/моль (с учётом теплопритоков в холодную зону) при расчётном значении $q_0^p = 734$ Дж/моль, что согласуется с погрешностью измерений.

В конце главы приведены результаты экспериментальной оптимизации тройной смеси Ar-R14-R218 последовательным симплекс-методом, который отличается простотой, требует несложных вычислений при проведении статистической обработки результатов эксперимента и выбора на-

правления движения, обеспечивает высокую скорость движения к экстремуму целевой функции. Максимальная холодопроизводительность $q_0 = 702$ Дж/моль получена на МРТ следующего состава (в мол. долях): аргон - 0,57; хладон I4 - 0,09; хладон 218 - 0,34.

Значения концентраций компонентов несколько отличаются от расчётных, но величины холодопроизводительности совпадают в пределах погрешности эксперимента, что свидетельствует о существовании области максимума функции отклика, в пределах которой характеристики цикла меняются мало.

В четвёртой главе изложены требования и описаны особенности основных узлов ДМКС для охлаждения ЭМП-квантоскопа, а также приведены результаты испытаний опытного образца системы охлаждения с тепловым макетом квантоскопа.

В качестве компрессора использован несмазываемый одноступенчатый прямоточный двухцилиндровый оппозитный ЭДК с приводом от электрического двигателя возвратно-поступательного движения с электромагнитным возбуждением. Особенности цилиндра-поршневой группы: целевое уплотнение поршня и линейная опора качения ЛОК. Клапана самодельные, всасывающий клапан (конусный) установлен в поршне, нагнетательный (пяточный) - на цилиндре. Применение в изнашивающихся парах (запорный орган-седло клапана, сепаратор ЛОК-гильза, сепаратор ЛОК-шарик) композиционного материала ФС-2 позволяет обеспечить ресурс 6 тыс. часов.

Микротеплообменник -3-х слойный 3-х заходный противоточный рекуперативный типа Хемпсона. Регулировка расхода МРТ через дроссельное отверстие осуществляется механически с помощью клапанной иглы.

При разработке узла стыковки ДМКС с квантоскопом учтены специфические требования, обусловленные необходимостью его замены через каждые 750 часов работы при продолжительности регламентных работ не более 2-х часов. Кроме этого, конструкция узла стыковки и изоляция должны сводить к минимуму теплоприток из окружающей среды при обеспечении требуемой температуры внутри мишени (не более 130 К) и свободного прохождения сигнала через входное окно (отсутствие его запотевания).

В табл.3 приведены результаты испытаний опытного образца ДМКС на трехкомпонентном МРТ Ar - R14 - R218 оптимального состава с тепловым макетом квантоскопа.

Таблица 3

Наименование параметра, единицы измерения	Расчет	Эксперимент
Давление прямого потока, МПа	3,27	3,3
Давление обратного потока, МПа	0,65	0,65
Недорекуперация, К	5	6,3
Температура криостатирования, К	120	120
Температура в центре мишени, К	-	130
Холодопроизводительность на уровне криостатирования, Вт	32,1	32,1
Расход МРТ, 10 ⁻³ кг/с	4,3	4,8

Основные характеристики экспериментального образца ДМКС, определённые в процессе испытаний:

время выхода на рабочий режим (момент достижения температуры 130 К в центре мишени квантоскопа) не превышало 1 час 15 мин., воспроизводимость по 6-и пускам хорошая;

энергопотребление компрессора в стационарном режиме (при производительности 0,6 м³/ч по условиям всасывания) не превышало 350 Вт;

эксергетический КПД ДМКС составил 13,7%.

Анализ результатов испытаний позволяет сформулировать следующие выводы:

подтверждена правильность выбора основных технических решений и получено, в целом, удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных значений параметров и характеристик ДМКС;

увеличение расхода МРТ на 12% обусловлено увеличением недорекуперации по сравнению с расчётным значением.

Ниже проведено сравнение по величине эксергетического КПД трёх типов систем криостатирования на уровень охлаждения 120 К, разработанных в НИИ "Штурм" в 90-е годы:

	$\eta_e, \%$
на базе свободно-поршневого детандера (СПД)	5,3
по циклу сплит-Стирлинга	15,5
ДМКС на МРТ	13,7

Как видно, энергетические показатели ДМКС на МРТ сопоставимы с показателями систем криостатирования, выполненных по схеме сплит-Стирлинга и более чем в два раза превосходят показатели систем криостатирования на базе СПД. С учётом удобства стыковки с охлаждаемым объектом и отсутствия вибрации в холодной зоне для охлаждения и криостатирования аппаратуры на уровне 120 К целесообразно применять ДМКС на разработанном трёхкомпонентном криоагенте Ar-R14-R218.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

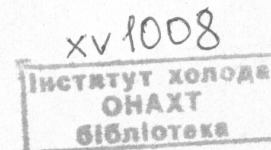
1. Получила развитие методика оптимизации дроссельного цикла на смеси в части выбора независимых переменных, процедуры локализации экстремума целевой функции и алгоритма расчёта парожидкостного равновесия. Её применение, существенно сокращая объём вычислений, обеспечивает достижение максимальной термодинамической эффективности цикла при заданных значениях температур криостатирования, отношения давлений и минимальной разности температур потоков в процессе регенерации холода.

2. Выполненные расчётно-теоретические исследования показали, что использование смесей в дроссельном цикле с температурой криостатирования 120 К открывает возможность создания достаточно эффективных высокоресурсных ДМКС на базе электродинамических компрессоров с одноступенчатым сжатием.

Так, разработанный экологически чистый пожаро- и взрывобезопасный трёхкомпонентный криоагент Ar-R14-R218 обеспечивает получение эксергетического КПД цикла около 30% при отношении давлений потоков $\sigma = 5$.

Экспериментальные исследования характеристик двух типоразмеров дроссельных микроохладителей подтвердили обоснованность теоретических выводов и рекомендаций по составу МРТ и условиям их применения.

4. Испытания созданного с использованием результатов работы опытного образца ДМКС на базе одноступенчатого электродинамического компрессора, предназначенного для охлаждения квантоскопа, показали, что по энергетическим характеристикам он более чем вдвое превосходит микрокриогенные системы со свободно-поршневым детандером и в состоянии конкурировать с системами, работающими по циклу сплит-Стирлинга.



Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Захаров Н. Д., Сурьянинова Н. Н. Оптимизация дроссельного цикла на смесях с температурой криостатирования 120 К на базе одноступенчатого компрессора. - В сб.: Рискотемпературная сверхпроводимость. М. - 1990, Вып. 3 - 4, с. 118-120.

2. Сурьянинова Н. Н., Захаров Н. Д., Луканов И. И. Разработка и испытание дроссельного микротеплообменника для микрокриогенных систем/ Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, вып. 4, 1991, с. 79-83.

3. Сурьянинова Н. Н. Выбор состава смеси на уровень 120 К для дроссельных систем различного назначения/ В сб.: Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры, вып. 1, 1993, с. 51-54.

4. Сурьянинова Н. Н., Захаров Н. Д., Моисеев В. Ф., Обертун О. С. Замкнутая дроссельная система охлаждения на температурный уровень 120 К. - Тез. докладов международной научно-практической конференции "Криогенная техника - наука и производству", М.: ЦИТИ ХИМНЕТЕМАШ, 1991, с. 122.

5. Захаров Н. Д., Сурьянинова Н. Н. Исследование макета дроссельной микрокриогенной системы с уровнем охлаждения 120 К. - Тез. докладов научно-технической конференции преподавателей и сотрудников ОТИШ им. М. В. Ломоносова, г. Одесса, 1993г.

6. Заявка № 5014980/04 060847 от 08.01.91г. Положительное решение о выдаче патента от 25.05.92г. .

ЛД

Подписано к печати 20.05.94 г. Формат I/16

Объем 1,0 п.л. Зак. № 226 Тир. 100 экз.

Ротапринт ОТИШ