

Солнцев
Автореферат
Т 67

проф. Трушину И. В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи
Для служебного пользования
Экз. № 00040

ТРИГУБ Александр Васильевич

УДК 621.565.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСА РАБОТЫ
КОМПРЕССИОННОЙ ДРОССЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
НА ДИАПАЗОН ТЕМПЕРАТУР 190...220К

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 ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1986

xv 1018
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

Научный руководитель - доктор технических наук,
доцент Г.К.Лавренченко

Официальные оппоненты- доктор технических наук,
профессор И.Д.Коноплев;
- кандидат технических наук,
доцент С.Д.Глухов

Ведущее предприятие - ФТИИТ АН УССР (г. Харьков)

Защита диссертации состоится "20 декабря 1986г.
в 11 часов на заседании специализированного совета К₂068.27.01
при Одесском технологическом институте холодильной промышленности
(270057, г.Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ОТИХП).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "19 ноября 1986г.

...ный секретарь
...зованного совета,
...еских наук,

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многочисленные электронно-оптические приборы нуждаются в низкотемпературной стабилизации их отдельных узлов и элементов. До недавнего времени такие устройства разрабатывались на уровень азотных температур с небольшой холодопроизводительностью (от долей до нескольких ватт).

В последние годы появился ряд приборов этого типа, требующих охлаждения в диапазоне более высоких температур, в частности, температур 190...220К. Необходимые для этого системы охлаждения с холодопроизводительностью от единиц до десятков ватт должны обладать, наряду с высокой экономичностью, также повышенной надежностью, ресурсом непрерывной работы, составляющим десятки тысяч часов.

Требованиям высокой эффективности могут удовлетворять компрессионные дроссельные системы охлаждения (КДСО), работающие на эффективных многокомпонентных рабочих телах (МРТ). Работами В.М.Бродянского, М.Ю.Боярского (МЭИ); А.К.Грезина, Н.Д.Захарова (НПО "Микрокриогенная техника"); А.Д.Суслова, С.Д.Глухова (МВТУ им. Баумана); А.В.Мостицкого (НИИ "Сатурн"); В.А.Никольского, В.М.Ягодина (ВНИЭКИЭМП) и др. доказана высокая эффективность КДСО, использующих смеси веществ.

Большинство КДСО (в основном для криостатирования на уровне азотных температур) разрабатываются на базе компрессоров без смазки с относительно высокими давлениями нагнетания (4...10МПа). Но при создании КДСО с температурами охлаждения даже 190...220К трудно достичь высокой эффективности, ориентируясь на смазываемые компрессоры одноступенчатого сжатия, хотя они и обеспечивают требуемый ресурс работы. Анализ показал, что одновременно решить задачу повышения эффективности и ресурса работы систем, предназначенных для производства холода в диапазоне температур 190...220К, можно формированием эффективного рабочего тела с учетом особенностей разрабатываемых КДСО (обеспечением устойчивой циркуляции компрессорного масла; влиянием рода рабочего тела на характеристики компрессора; различием в валовых составах циркулирующей и заправляемой смесей).

Цель и задачи исследования. Цель работы состоит в создании на основе расчетных и экспериментальных исследований методики определения оптимального состава и количества заправляемой смеси с учетом потерь от внутренней и внешней необратимости; влияния рода

рабочего тела на объемные и энергетические характеристики компрессора; количества жидкой фазы смеси, находящейся в теплообменных аппаратах системы охлаждения.

Основными задачами при этом являются: обоснованный выбор компонентов для формирования эффективной смеси, а также компрессорного масла, обладающего хорошими противозносными и смазывающими свойствами; изучение объемных и энергетических характеристик герметичного компрессора в зависимости от состава смеси; исследование основных факторов, влияющих на различие в составах заправляемой и циркулирующей смеси.

Научная новизна. Впервые, с учетом особенностей исследованного типа КДСО, создана методика расчета оптимального состава и количества заправляемого в систему МРТ; установлен характер зависимости объемных и энергетических характеристик компрессора от содержания в смеси высококипящего компонента; обнаружено существенное влияние залегания жидкой фазы смеси в концевом холодильнике на различия в валовых составах заправляемой и циркулирующей смеси.

Основное научное положение, новизна которого защищается автором:

На различие в валовых составах заправляемой и циркулирующей смесей превалирующее влияние оказывает залегание жидкой фазы смеси в концевом холодильнике системы.

Кроме этого, автор защищает:

1. Методику определения оптимального состава и количества заправляемого в систему МРТ.

2. Рекомендации по выбору масел, обладающих высокими противозносными и смазывающими свойствами.

3. Рациональные конструктивные решения, обеспечивающие высокую эффективность КДСО и повышенный ресурс работы (отказ от маслоотделителя; применение самоочищающегося регулируемого дросселя; использование рекуперативного теплообменника типа труба в трубе, допускающего изменения положения в пространстве).

4. Энергетические характеристики эффективных систем охлаждения электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) на базе компрессора ХКВ5.

5. Методику измерений теплопритоков к ЭЛТ с помощью КДСО и конкретные результаты исследований.

Основные результаты работы:

1. Подтверждено, что введение в смесь, содержащую R23 и R600, низкокипящего компонента RI4 позволяет повысить энергетическую эффективность КДСО (А.с. №И134856).

2. Доказано, что наличие в рабочем теле в качестве одного из компонентов R600 дает возможность применять масла ХФ22с-16 и ХФ12-16 в системах с уровнем охлаждения до 150К.

3. Разработана методика определения скорости течения фаз двухфазного потока с привлечением ограниченной информации о свойствах рабочего тела и учетом особенностей КДСО.

4. Установлено, что рост содержания R600 в циркулирующей смеси при практически одинаковых степенях повышения давления компрессора приводит к снижению его коэффициента подачи.

5. Показана возможность использования КДСО в режиме тепломера.

Практическая ценность. На основе новых рабочих тел созданы макетные и экспериментальные образцы КДСО на уровне охлаждения 190...220К, обладающие улучшенными энергетическими, массо-габаритными и эксплуатационными характеристиками.

Результаты работы применены в опытно-конструкторских разработках на предприятиях п/я Р-6324, п/я А-1775. Разработаны и поставлены указанным предприятиям экспериментальные образцы систем охлаждения ЭЛТ.

Апробация работы. Основные результаты исследований по данной работе докладывались на Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (г.Москва, МВТУ им.Баумана, 1983г.); на научно-технической конференции "Молодые специалисты и молодые ученые производству" (г.Одесса, НПО "Кислородмаш", 1984г.); на научно-технических конференциях ОТИХП (г.Одесса).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 2 печатные работы, получено 3 авторских свидетельства.

Объем и структура диссертации. Работа изложена на 114 стр. машинописного текста, содержит 60 рис., 15 табл. и состоит из введения, пяти глав, списка литературы из 77 назв.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Задачи совершенствования КДСО на диапазон температур 190...220К

Среди электронно-лучевых приборов, нуждающихся в термостабилизации при $T_x=190...220К$, наиболее распространенными являются электронно-лучевые трубки (ЭЛТ). Системы охлаждения ЭЛТ должны характеризоваться следующими параметрами: холодопроизводительность

- до 10Вт; минимальные масса и габариты, энергопотребление; ресурс непрерывной работы - не менее 30 тыс. часов. Данным требованиям наиболее полно могут удовлетворять КДСО, работающие на смесях веществ. В таких системах реализуются циклы с развитой регенерацией и эффективным дросселированием.

Достаточно высокие значения эксергетического КПД, даже при использовании компрессоров с одноступенчатым сжатием, следует ожидать в случаях, когда рабочее тело формируется на основе компонентов, образующих в широком диапазоне составов расслаивающуюся смесь.

Рабочие тела для систем на указанные T_x можно разрабатывать на основе бинарных расслаивающихся смесей R23 с R290, R600A и R600 с добавками RI4. Для выбора на первом этапе лучшей смеси и типа цикла в соответствии с методикой, предложенной Н.И. Додельцевой, решалась задача определения

$$\bar{z}_{ц}^*, P_1^*, P_2^* \equiv \text{opt} \{ \bar{z}_{ц}, P_1, P_2 \} \rightarrow \text{Max } \eta_e \quad (I)$$

В табл. I приведены результаты решения задачи (I) для условий когда $T_0=300\text{K}$, $T_x=200\text{K}$, $P_1=0,3\text{МПа}$, $\gamma=5$. Таблица обобщает данные оптимизационных расчетов для случаев, когда в идеализированных циклах сжатие смеси осуществляется при $T=T_0=\text{const}$ и $S=\text{const}$.

Таблица I.

Смеси	Оптимальн. составы, моль/моль			q_x , Дж/моль	η_e
	z_1	z_2	z_3		
Сжатие при $T=\text{const}$					
RI4-R23-R290	0,097	0,200	0,703	1226	0,17
RI4-R23-R600A	0,453	0,207	0,277	838	0,11
RI4-R23-R600	0,513	0,290	0,197	761	0,10
Сжатие при $S=\text{const}$					
RI4-R23-R290	0,029	0,310	0,661	1211	0,14
RI4-R23-R600A	0,025	0,550	0,425	5289	0,65
RI4-R23-R600	0,027	0,568	0,405	6460	0,77

Из таблицы следует, что наивысшие значения энергетических характеристик отвечают циклу с адиабатным сжатием, который реализуется на трехкомпонентной смеси RI4-R23-R600. На данную смесь, как на эффективное рабочее тело, получено авторское свидетельство.

Однако практически достичь ожидаемой высокой эффективности

на данной смеси не так просто при использовании смазываемых герметичных компрессоров. Применение смазки, согласно исследованиям А.Д. Суслова, С.Д. Глухова и А.А. Бичева, приводит к снижению КПД системы, хотя, с другой стороны, увеличивает ресурс непрерывной работы компрессора. Маслоотделитель в КДСО, работающей на смеси RI4-R23-R600, устанавливать нецелесообразно, так как он одновременно сепарирует масло и R600, тем самым приводя к дальнейшему снижению эффективности системы из-за резкого уменьшения в смеси содержания высококипящего компонента. Наличие в КДСО маслоотделителя увеличивает, к тому же, массу и габариты системы, а также время выхода ее на режим.

Следует также учитывать, что КДСО при использовании смеси RI4-R23-R600, содержащей большое количество R600 с высокой критической температурой, реализует цикл, который ближе к циклу паровой холодильной компрессорной машины, нежели к циклу газовой криогенной машины. Подтверждением этого является большое значение доли жидкости в конце процесса частичной конденсации. В связи с этим могут наблюдаться такие режимы работы КДСО, когда в конечном холодильнике залегает жидкая фаза смеси.

Надежность разработки КДСО снижается недостаточностью данных об энергетических и объемных характеристиках герметичного компрессора, работающего на смеси в составе КДСО.

Для достижения приемлемой эффективности и повышения ресурса работы необходимо с учетом особенностей создаваемых КДСО решить следующие задачи:

1. Выбор масла, которое обладает хорошими смазывающими, противозносными свойствами; высокой степенью растворимости с отдельными компонентами смеси для обеспечения устойчивой циркуляции масла и предотвращения замерзания масла в испарителе.

2. Поиск конструктивных решений, предотвращающих забивку дроссельного устройства высокотемпературными примесями, содержащимися в компонентах смеси и особенно в компрессорном масле, а также во внутренних полостях системы.

3. Создание макетного образца КДСО; исследование его энергетических характеристик; изучение энергетических и объемных характеристик компрессора в составе КДСО и в калориметрическом стенде; установление факторов, приводящих к отличию валовых составов циркулирующей $z_{ц}$ и заправляемой z_3 в систему смеси.

4. Разработка методики определения

$$\bar{z}_{ц}^*, \bar{z}_3^*, P_1^*, P_2^*, M^* \equiv \text{opt} \{ \bar{z}_{ц}, \bar{z}_3, P_1, P_2, M \} \rightarrow \text{Max } \eta_e$$

с учетом потерь от внутренней и внешней необратимости, особенностей разрабатываемых КДСО.

5. Создание экспериментальных образцов КДСО; исследование их характеристик для подтверждения разработанной методики решения задачи (2).

2. Мероприятия по увеличению ресурса непрерывной работы КДСО

Для повышения ресурса работы системы охлаждения следует разрабатывать на основе смазываемых герметичных компрессоров, например, К063 и ККВ5. При их использовании в КДСО, не имеющих маслоотделителей, необходимо обеспечить устойчивую циркуляцию компрессорного масла. Это оказывается возможным в тех случаях, когда выносимое из компрессора масло будет растворяться в компонентах МРТ и, как следствие, не замерзает в испарителе КДСО.

На установке по исследованию фазовых равновесий были проведены измерения температур замерзаемости смесей R600, R23, RI4 и относительно высокотемпературных масел ХФ12-16 и ХФ22с-16, обладающих наилучшими смазывающими и противоизносными свойствами. На рис.1 представлен характер изменения температур замерзания смесей масел с компонентами МРТ и другими веществами в зависимости от весовой концентрации компонентов. Анализ показывает, что смеси ХФ12-16 и ХФ22с-16 с такими веществами, хорошо растворяющимися масла, как R600 и R290, имеют температуры замерзания на 70...120К ниже температур застывания чистых масел. В отличие от этого, низкая растворимость R23 и RI4 в маслах оказывает слабое влияние на температуру замерзания исследованных смесей.

Таким образом, хорошая растворимость ХФ12-16 и ХФ22с-16 в R600 обеспечит, даже при отсутствии маслоотделителей, устойчивую циркуляцию масла в системе охлаждения, создаваемой на основе смазываемых герметичных компрессоров.

Довольно сложной задачей при создании надежных КДСО является предотвращение забивок дроссельного устройства. Забивки, в основном, вызываются водой и другими высококипящими веществами, содержащимися в компонентах смеси и компрессорном масле. Обеспечить глубокую очистку хладагентов и особенно масла крайне сложно. Поэтому в КДСО должно использоваться самоочищающееся дроссельное устройство. Имеющиеся конструкции имеют ряд недостатков. Разработанное дроссельное устройство схематично изображено на рис.2. Работает данное устройство следующим образом. Рабочее тело после ох-

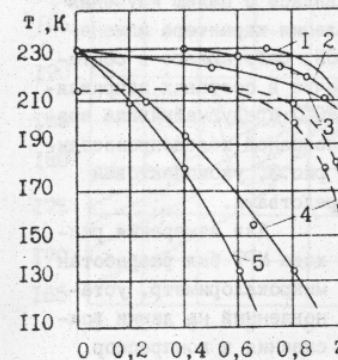


Рис.1. Зависимость температур замерзания смесей масло-компонент от весового содержания: 1-RI2; 2-R600; 3-R290; 4-R23; 5-RI4; --- ХФ12-16; - - - ХФ22с-16.

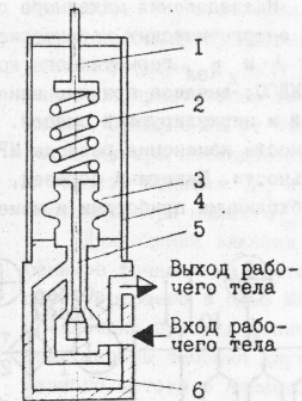


Рис.2. Схема самоочищающегося дроссельного устройства.

лаждения в рекуперативном теплообменнике, трубки которого навиты на обечайку 4, поступает в полость, расположенную под клапаном 5. Дросселирование происходит в зазоре между клапаном и седлом. Сдросселированное рабочее тело попадает в испаритель 6 и затем покидает его через отверстие "выход рабочего тела". Объем испарителя связан с внутренней полостью сиффона 3. Положение клапана относительно седла зависит от давления в полости сиффона и регулируется при помощи винта 1, воздействующего на пружину 2. При понижении давления в испарителе, вызванном забивкой зазора между седлом и клапаном, происходит соответствующее понижение давления внутри сиффона 3, и он начинает сжиматься, перемещая клапан вниз. В результате этого увеличивается зазор между седлом и клапаном, и источник засорения выдувается рабочим телом. Давление в испарителе повышается, клапан поднимается и занимает первоначальное положение.

В комплекс мероприятий по повышению надежности входила разработка теплообменников, которые, во-первых, сохраняют работоспособность при возможных изменениях ориентации в пространстве, во-вторых, не "захлебываются" при прохождении через них увлажненных или жидкостных потоков МРТ с маслом.

3. Результаты исследований макетного образца КДСО

Исследования макетного образца проводились с целью изучения его энергетических характеристик; установления характера изменения λ и $\eta_{эл}$ герметичного компрессора Ю6З, работающего в составе КДСО; анализа причин, влияющих на различие в составах заправляемой и циркулирующей смесей. Конструкция КДСО предусматривала возможность изменения расхода МРТ, имитации полезной холодопроизводительности. Макетный образец, как видно из рис.3, укомплектован необходимыми приборами и измерительными средствами.

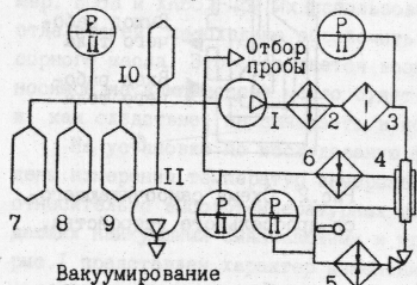


Рис.3. Макетный образец КДСО:
1-компрессор; 2-концевой холодильник;
3-фильтр-осушитель; 4-теплообменник;
5-испаритель; 6-калориметр; 7-9-заправочные баллоны с веществами; 10-заправочная емкость; II-вакуум-насос.

Для измерения расхода МРТ был разработан микрокалориметр, установленный на линии всасывания в компрессор. Погрешность определения расхода не превышала 6%. Определение состава смеси $z_{ц}$ проводилось хроматографом типа "Цвет". Отборник пробы установлен на линии обратного потока, что гарантировало газовое состояние смеси.

Так как результаты исследований предполагалось использовать для создания методики определения оптимальных состава и массы МРТ, заправляемого в систему, а также давлений P_1^* и P_2^* , то заправка макетного образца смесью RI4, R23, R600 проводилась путем планирования опытов по схеме полного факторного эксперимента. В итоге был найден следующий оптимальный состав, отвечающий условиям задачи (2): $z_1=0,05$, $z_2=0,21$ и $z_3=0,74$.

На макетном образце изучалось влияние различных факторов на его энергетические характеристики: q_x , $w_{эл}$ и η_e . Рис.4 в качестве примера иллюстрирует изменение полезной холодопроизводительности от температуры охлаждения t_x при вариациях давления в испарителе $P_{и}$. Когда $q_x=0$, т.е. при затратах холодопроизводительности только на компенсацию теплопритоков, минимальные температуры при изменениях $P_{и}$ от 0,18 до 0,28МПа достигали 168...176К.

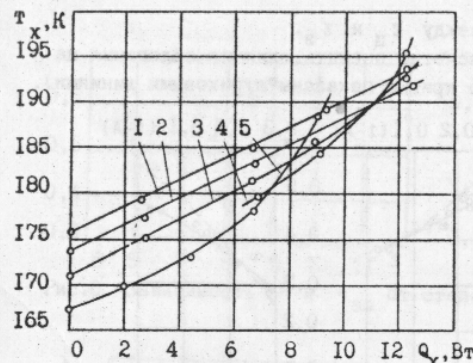


Рис.4. Зависимость температуры охлаждения от полезной нагрузки при фиксированных давлениях в испарителе $P_{и}$:
1-0,28; 2-0,26; 3-0,24; 4-0,21;
5-0,18МПа.

При росте q_x в области малых холодопроизводительностей функция $q_x=f(t_x)$ меняется практически линейно. Отклонения от этого характера наблюдаются в области больших q_x и, особенно, при малых $P_{и}$.

Для оценки влияния режимов течения на состав циркулирующего в КДСО МРТ предложена простая физическая модель течения двухфазного потока в концевом холодильнике. Согласно модели поток жидкой фазы разбивается на два потока: первый имеет скорость, равную скорости пара; второй

- нулевую скорость относительно стенок канала. Обозначим отношение количества жидкости, имеющей нулевую скорость, ко всей жидкости через Δ . Тогда массу каждого компонента, находящуюся в выделенном объеме, можно выразить через Δ и известные составы жидкой и паровой фаз:

$$m_i = \delta(1-\Delta)x_i + (1-\delta)y_i, \quad i=1, \dots, N, \quad (3)$$

где N - число компонентов.

Зная циркулирующий $z_{ц}$ и заправочный z_3 валовые составы, можно найти Δ как

$$\Delta = \frac{(x_i - y_i)(z_1 - (z_3)_i)}{(z_3)_i - y_i}, \quad i=1, \dots, N. \quad (4)$$

Процесс, в результате которого появляется часть жидкости, имеющей нулевую скорость движения, назовем залеганием жидкой фазы. Залегание жидкой фазы смеси в концевом холодильнике вызвано тем, что оптимальные состав и масса рабочего тела устанавливаются, исходя из экстремальных условий работы КДСО (например, для наименьшей и наивысшей, соответственно, температур охлаждения и окружающей среды; максимальной холодопроизводительности). При работе на более легких режимах из-за отсутствия ресивера в концевом холодильнике происходит залежание некоторого количества жидкой фазы

МРТ. Это приводит к различию между z_2 и z_3 .

При различных A можно расчетно оценить влияние залегания на циркулирующий состав (на рис.5 кривые показаны штриховыми линиями).

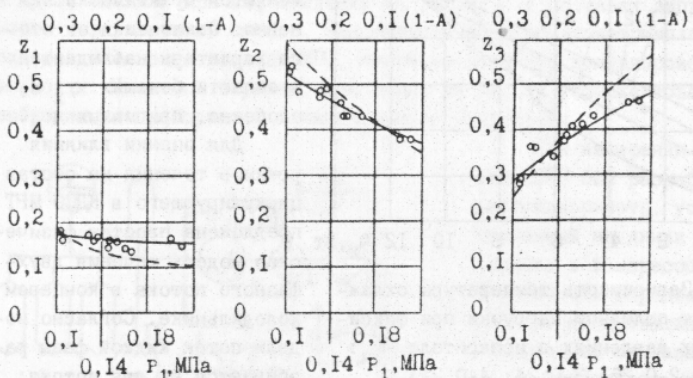


Рис.5. Зависимость состава циркулирующего в КДСО МРТ от залегания жидкой фазы (---) и от давления всасывания P_1 (—).

Для проверки правильности предложенной методики были проведены хроматографические исследования влияния P_1 на циркулирующий состав МРТ, заправленного в КДСО (сплошные линии на рис.5). Из рисунка видно, что предложенная модель хорошо коррелирует изменение циркулирующего в КДСО состава (с ростом P_1 увеличивается расход МРТ, что приводит к уменьшению залегания жидкой фазы в конечном холодильнике). Это подтверждает защищаемое научное положение.

Располагая информацией о циркулирующих составах МРТ, можно было провести исследование объемных и энергетических характеристик компрессора, работающего в составе КДСО. Результаты исследований приведены на рис.6. Установлено неоднозначное влияние содержания R600 на коэффициент подачи.

Для объяснения характера изменения объемных характеристик были проведены исследования компрессора на чистом R600 и веществе, моделирующем в первом приближении МРТ. В качестве этого вещества был выбран R22. Выбор был обусловлен близостью критических параметров R22 соответствующим квазикритическим характеристикам МРТ. Результаты измерений приведены на рис.7. Коэффициенты подачи компрессора при одинаковой степени повышения давления и фиксированном перегреве на входе в компрессор снижаются при росте давления

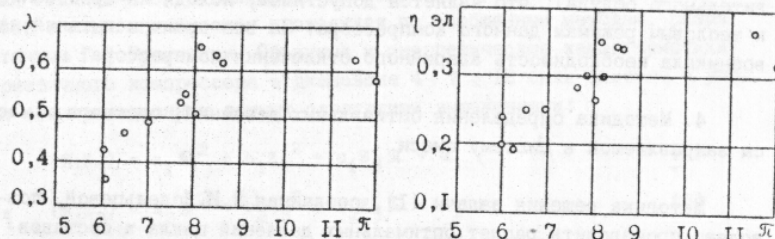


Рис.6. Зависимость λ и $\eta_{эл}$ от степени повышения давления π .

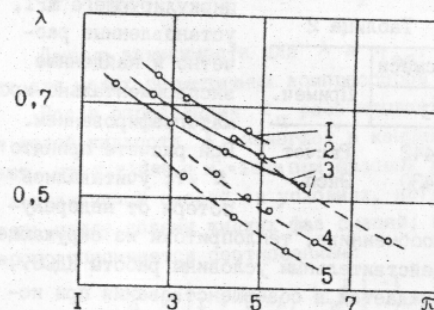


Рис.7. Зависимость коэффициента подачи от степени повышения давления I-0,102; 2-0,145; 3-0,202; 4-0,290; 5-0,360МПа; — R600; --- R22.

всасывания. Из рисунка видно, что при $P_1=0,202$ МПа в области $\pi < 6$ коэффициент подачи $\lambda_{R22} > \lambda_{R600}$. При $\pi > 6$ знак неравенства меняется на противоположный, т.е. λ компрессора при работе на R600 становится выше λ для случая, когда применяется в качестве рабочего тела R22. Но при работе на МРТ в области, где $\pi > 6$, увеличение содержания R600, наоборот, при $\pi = idem$ приводит к уменьшению коэффициента подачи компрессора. Очевидно,

это вызвано тем, что с ростом z_3 одновременно повышается и P_1 .

Разработанное МРТ улучшает энергетические характеристики КДСО и одновременно с этим снижает температурную напряженность компрессора на 10...15К по сравнению с режимами работы его на чистых R12 и R22. Это также положительно сказывается на надежности работы всей КДСО.

Для проверки правильности принятых решений, направленных на повышение ресурса работы КДСО, проводились испытания системы на протяжении более 30 тыс. часов. В результате было установлено, что энергетические характеристики практически не изменялись за все время испытаний. Не наблюдались забивки дроссельного устройства. В стационарном режиме изменение температуры охлаждения при $q_x = -12$ Вт не превышали $\pm 0,5$ К. Температура наружного кожуха компрессора

ра в самых неблагоприятных условиях не превышала 353К (без принудительного обдува), что является допустимым; исходя из требований к тепловым режимам данного компрессора. За все время испытаний не возникала необходимость аварийного отключения компрессора.

4. Методика определения оптимальных давлений, составов и массы заправляемой в систему смеси

Методика решения задачи (1), созданная Н.И.Додельцевой, позволяет производить расчет оптимальных давлений цикла и составов циркулирующей в системе смеси $z_{ц}$.

В табл.2 для подтверждения данного вывода приведены составы циркулирующего МРТ, установленные расчетно и найденные экспериментально хроматографированием.

Таблица 2

Р, МПа	Состав циркулирующей смеси			Примеч.
	z_1	z_2	z_3	
0,161	0,148	0,410	0,442	Расчет
0,167	0,138	0,432	0,430	Эксп.

При расчете принято $\kappa = 7$; учитывались потери от недорекуперации на теплом конце теплообменника, теплопритоки из окружающей среды, что соответствовало действительным условиям работы КДСО.

Существующая методика нуждается в совершенствовании при использовании ее для решения задачи (2). Это вызвано необходимостью учета следующих особенностей КДСО рассматриваемого типа: влияния на λ и $\eta_{эл}$ одновременно со степенью повышения давления κ и содержания в МРТ высококипящего компонента; залегаания жидкой фазы смеси в конечном холодильнике КДСО.

Принимая это во внимание, можно решить задачу разработки совершенных КДСО. В качестве целевой функции использовался эксергетический КПД

$$\eta_e = |\tau_e| \eta_{эл}(\kappa, z_3) \frac{\Delta i_{T_0}(\bar{z}_{ц}, P_1, P_2, T_0) - \sum q_1}{1(\bar{z}_{ц}, P_1, P_2, T_1)} \quad (5)$$

где T_1 - температура всасывания в компрессор; $\sum q_1$ - сумма удельных потерь холодопроизводительности от недорекуперации и теплопритоков.

При решении задачи (2) как задачи нелинейного программирования учитывался ряд ограничений (термодинамических, стехиометрических, эксплуатационных). Использовалось единое уравнение состо-

яния Редлиха-Квонга-Вильсона. Многократный расчет фазовых равновесий в ходе оптимизации проводился по обобщенным методам, разработанным Г.Я.Рувинским. Объемные и энергетические характеристики герметичного компрессора в диапазоне $4 \leq \kappa \leq 12$ были описаны с учетом эксплуатационных данных следующими выражениями:

$$\lambda(\kappa, z_3) = a_1 \kappa^2 + b_1 z_3^2 + c_1 z_3 \kappa + d_1 \quad (6)$$

$$\eta_{эл}(\kappa, z_3) = a_2 \kappa^2 + b_2 z_3^2 + c_2 z_3 \kappa + d_2 \quad (7)$$

где $a_1 = -3 \times 10^{-3}$; $b_1 = -3,177$; $c_1 = 1,2 \times 10^{-3}$; $d_1 = 0,871$;

$a_2 = -2 \times 10^{-3}$; $b_2 = -1,777$; $c_2 = 7,2 \times 10^{-3}$; $d_2 = 0,455$.

Данные зависимости для λ и $\eta_{эл}$, как показал анализ, подходят для малых герметичных компрессоров К063, ХКВ5 и ХКВ6.

После определения $z_{ц}$ рассчитывается z_3 . Для этого задаются доли жидкости А, залегающей в конечном холодильнике, и учитывают, что $u_1 = idem$ и $x_1 = idem$ при фазовых равновесиях циркулирующей и заправляемой смесей (в условиях, когда $T = T_0$, $P_2 = P_2^*$). Тогда связь между долями жидких фаз смесей, находящихся в равновесии с паром, описывается соотношением:

$$\delta^0 = \left[1 + (1-A) \frac{1-\delta}{\delta} \right]^{-1} \quad (8)$$

где δ^0 и δ - доли жидких фаз смесей валовых составов, соответственно, z_3 и $z_{ц}$. Составляющие вектора валового состава заправляемой смеси, исходя из (8), определяются как

$$z_i^0 = \delta^0 x_i + (1-\delta^0) y_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

При найденных P_1^* , P_2^* , $z_{ц}^*$, z_3^* производится расчет M^* . Таким образом, разработанная методика позволяет решить задачу (2).

Оптимизационные расчеты, проводившиеся по указанной методике, показали хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований макетного образца, заправленного смесью с $z_1^0 = 0,04$, $z_2^0 = 0,16$, $z_3^0 = 0,80$ для условий, когда $T_x = 200K$. Расчеты z_3^0 дали при $A = 0,7$ практически совпадающие результаты: $z_1^0 = 0,03$; $z_2^0 = 0,14$; $z_3^0 = 0,83$.

Б. Разработка и исследование экспериментальных образцов КДСО

Решения, получившие апробацию на стадии создания и исследо-

вания макетного образца КДСО, использовались для разработки экспериментальных образцов КДСО, предназначенных для термостабилизации ЭЛТ. Разработка КДСО проводилась для ЭЛТ двух типов, отличающихся не только назначением, но и конструкцией выходящего за пределы вакуумной колбы холодопровода - кольцевого или стержневого.

К разрабатываемым системам охлаждения предъявляются следующие требования: диапазон температур охлаждения 203...223К; точность поддержания температуры $\pm 0,1$ К; время выхода на заданный уровень охлаждения не более 45 мин.; ресурс работы порядка 30 тыс. часов; исключение вибраций ЭЛТ, электромагнитных полей в зоне охлаждения, запотевания окна лампы, через которое поток света воздействует на кристалл; экономичность; малые массы и габариты (в частности, холодной части) и др.

Соответствие этим требованиям достигается применением герметичного смазываемого компрессора ХКВ5; эффективного МРТ; самоочищающегося дроссельного устройства; разнесением компрессорно-конденсаторного агрегата и холодной части КДСО на расстояние $\gg 3$ м.

Результаты испытания экспериментального образца КДСО приведены на рис.8.

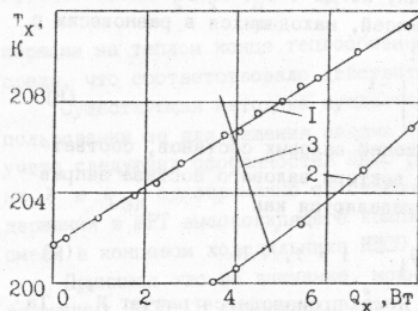


Рис.8. Зависимость Q_x экспериментальной КДСО от T_x :
1-с ЭЛТ; 2-без ЭЛТ; 3-теплопритоки

токов к ЭЛТ при изменении температуры охлаждения.

Исследования энергетических характеристик экспериментальных образцов КДСО указывают на хорошую сходимость экспериментальных данных с расчетами по предложенной методике.

Разработанные экспериментальные образцы КДСО были переданы заказчику, где испытывались в реальных условиях работы. Испытания подтвердили соответствие этих систем техническим требованиям.

Однозначность зависимости холодопроизводительности КДСС от температуры T_x позволяет использовать разработанные системы в качестве тепломера. Для этого необходимо экспериментально определить зависимость Q_x системы от T_x с ЭЛТ и без нее (кривые 1 и 2). Результатом вычитания соответствующих Q_x при одинаковых температурах является кривая 3, отражающая величину теплопритоков к ЭЛТ при изменении температуры охлаждения.

Характеристики разработанных КДСО приведены в табл.3. Более

Таблица 3

T_x , К	T_x min, К	η_e , %	Q_x , Вт	Масло	Компрессор	Масса, кг	Система
193	168	5,6	12,5	ХФ22с-16	КО63	12,2	Макетный образец КДСО
203	201	1,5	7	ХФ12-16	ХКВ5	16,5	Экспериментальный образец КДСО для стержневой ЭЛТ
210		1,7	9				
210	198	1,8	9,5	ХФ12-16	ХКВ5	16,5	Экспериментальный образец КДСО для кольцевой ЭЛТ
193	150	2,3	9	ХФ12-16	ХКВ5	16,5	Имитатор системы охлаждения
203		3,4	16				

низкие значения η_e экспериментальных образцов обусловлены техническими требованиями, вызванными необходимостью снижения q_x для обеспечения нормальной работы системы автоматического регулирования температуры. Когда такие ограничения не учитывались, удавалось достичь приемлемых значений эффективности КДСО, как, например, для макетного образца.

В качестве систем-аналогов могут рассматриваться комбинированные системы охлаждения (компрессионно-термоэлектрические), а также каскадные микросистемы фирмы PTS Systems. Сравнение с комбинированными системами охлаждения показывает, что разработанные КДСО по всем параметрам превосходят их. Охладители фирмы PTS Systems, создаваемые на базе каскадного агрегата, по энергетической эффективности примерно равны энергетической эффективности макетного образца КДСО, но уступают ему по массо-габаритным показателям, так как рассчитаны на большую холодопроизводительность.

Выводы

1. Разработанная методика дает возможность рассчитывать оптимальные значения состава и массы заправляемого в систему МРТ и тем самым существенно сокращает количество экспериментальных исследований, необходимых для создания реальных КДСО.

2. Компрессорные масла ХФ12-16 и ХФ22с-16 могут применяться

в КДСО, создаваемых на основе смазываемых компрессоров и рабочих тел, формируемых из R14, R23 и одного из углеводородов (R600, R600A, R290).

3. Залегание жидкой фазы смеси в концевом холодильнике КДСО на диапазон температур 190...220K приводит к изменению валового состава циркулирующего в ней МРТ.

4. При практически одинаковых λ коэффициент подачи герметичного компрессора, работающего в составе КДСО, снижается при увеличении содержания в смеси высококипящего компонента (R600).

5. Установленное экспериментально существенное влияние рода рабочего тела на объемные и энергетические характеристики герметичного компрессора позволило получить зависимость λ и $\eta_{эл}$ от λ и содержания в МРТ высококипящего компонента (R600).

6. Предложенная модель течения двухфазного потока позволяет определить среднюю скорость течения фаз путем измерения составов циркулирующего и заправляемого рабочего тела.

7. Смеси, разрабатываемые на основе системы R14-R23-R600, являются лучшими рабочими телами для КДСО на уровне охлаждения из диапазона температур 190...220K.

8. Обоснованные в работе и реализованные конструктивные и схемные решения (использование герметичных компрессоров одноступенчатого сжатия с маслами, обладающими наилучшими смазывающими и противозносными свойствами; применение самоочищающихся дроссельных устройств; отказ от маслоотделителей и ресиверов) позволяют создавать системы с ресурсом непрерывной работы порядка 30 тыс. часов и эффективностью на уровне каскадных систем охлаждения.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Лавренченко Г.К., Тригуб А.В., Волгушев В.В., Дремова Н.В. Создание и исследование дроссельной рефрижераторной системы на уровень криостатирования 190K с использованием герметичного компрессора ЮБЗ.-В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной школы-семинара.-М.: МВТУ, 1983, с.22-23.

2. Г.К.Лавренченко, Н.И.Доделъцева, В.В.Волгушев, А.В.Тригуб. Термодинамические основы разработки компрессионных дроссельных систем охлаждения на смесях веществ.- Холод. техника и технология: Республ.межвед. научн.-техн.сб., 1985, вып.41, с.51-60.

3.А.с. 1078230 (СССР). Пластинчатый теплообменник / Г.К.Лавренченко, А.А.Сотников, А.В.Тригуб и др.-Опубл. в Б.И.,1984,№9.

4. А.с. 1086003 (СССР). Хладагент для низкотемпературной компрессионной холодильной машины / Г.К.Лавренченко, В.В.Волгушев, А.В.Тригуб.- Опубл. в Б.И., 1984,№14.

5. А.с. 1134856 (СССР). Рабочее тело для низкотемпературной компрессионной холодильной машины / Г.К.Лавренченко, В.В.Волгушев, А.В.Тригуб и др.- Опубл. в Б.И., 1985, №2.

Условные обозначения

Z - валовой состав; P - давление; η_e - эксергетический КПД; $\eta_{эл}$ - электрический КПД компрессора; t - температура; λ - степень повышения давления; m - масса; q_x - холодопроизводительность; W - мощность; δ - доля жидкости; A - коэффициент залегания; x - состав пара; y - состав жидкости; λ - коэффициент подачи компрессора.

Индексы

ц - циркулирующий; з - заправляемый; I - всасывание; 2 - нагнетание; о - окружающая среда; х - холодный источник; эл - электрический; и - испаритель; *- оптимальный параметр.

xv 1018
Институт холода
ОНАХТ
Библиотека