

Автореферат
№ 74

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для служебного пользования

Экз. № 0 09

На правах рукописи

МОИСЕЕВ Виктор Федорович

УДК.621.59-181.48:621.893

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ПАР ТРЕНИЯ МИКРОКРИОГЕННЫХ
СИСТЕМ СО СВОБОДНОПОРШНЕВЫМИ ДЕТАНДЕРАМИ

Специальность

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

05.02.04 - Трение и износ в машинах

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

Работа выполнена в научно-исследовательском институте "Штурм"

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Мещеряков Г.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Дроздов Ю.Ч.,

доктор технических наук,
доцент Милованов В.И.

Ведущее предприятие: ЦНПО "Комета, г.Москва

Защита диссертации состоится "2" июня 1988 г.
в 10 часов на заседании специализированного совета
К.068.27.01 при Одесском технологическом институте холодильной
промышленности по адресу: 270057: Одесса, ГСП, ул.Петра Вели-
кого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн. наук, доцент

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1. Актуальность тем. Использование в составе комплексов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приборов, элементы которых работают при криогенных температурах, требует создания микро-криогенных систем (МКС), ресурс которых был бы соизмерим с ресурсом РЭА. Такими МКС являются и автономные криорефрижераторы, относящиеся по условиям эксплуатации к группе невосстанавливаемых объектов. К ним предъявляются высокие требования по ресурсу - 10000 (и более) часов, а также по энергетическим показателям. Выпускаемые промышленностью МКС, технические характеристики которых в большей или меньшей степени отвечают условиям эксплуатации автономных криорефрижераторов, имеют ресурс только на уровне 3000 часов.

Одной из причин, ограничивающих ресурс МКС рассматриваемого типа, в которых в качестве генератора холода используется свободнопоршневой детандер (МКС с СПД), является низкая износостойкость пар трения. Износ пар трения и потери на трение значительно влияют на энергетические характеристики этих систем, их изменение во времени.

Таким образом, работы по повышению ресурса МКС по критерию износостойкости являются современными и важными.

Цель и задачи исследования. Цель работы - разработать и исследовать пары трения для МКС с СПД, обеспечивающие надежное функционирование в течение 10000 часов при минимальной деградации энергетических характеристик системы, обусловленной процессом изнашивания. В работе решались следующие задачи: оценка влияния износа различных пар трения МКС и СПД на изменение энергетических характеристик системы; экспериментальная оценка работоспособности самосмазывающихся антифрикционных материалов (САМ) в условиях работы пар трения МКС с СПД; исследование процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта и определение условий, обеспечивающих повышенную износостойкость; разработка САМ с заданной интенсивностью изнашивания для пар трения МКС с СПД; исследование фрикционно-износных характеристик разработанного САМ; определение ресурса пар трения и экспериментальная оценка изменения энергетических показателей МКС.

xv 1235

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Библиотека

Наиболее существенные научные результаты:

1. На основании результатов исследования процессов, определяющих отказы пар трения МКС с СПД, установлено:

путем обеспечения определенного комплекса фрикционно-износных и физико-механических характеристик возможно создание материала, обеспечивающего всем парам трения необходимый уровень ресурса, независимо от их функционального назначения;

определены закономерности процессов, протекающих в зоне фрикционного контакта и обеспечивающих низкую интенсивность изнашивания САМ при сухом трении в среде инертного газа.

2. Теоретически обосновано и экспериментально показано, что основной причиной деградации энергетических характеристик МКС с СПД, вследствие процесса изнашивания, является износ элементов динамических уплотнений.

3. Получена адекватная модель, связывающая интенсивность изнашивания разрабатываемого САМ с рабочими нагрузками и скоростями, характерными для области эксплуатации пар трения МКС с СПД.

Научные положения.

1. Необходимым условием для обеспечения высокой износостойкости полимерных композиций при сухом трении в среде криоагента (гелия), является реализация совокупности трех процессов, характеризующих механизм изнашивания в установившемся режиме: образования на металлическом контртеле прочно связанных с ним пленок вторичных структур, снижения за счет хорошей прирабатываемости удельных нагрузок в зоне фрикционного контакта и уменьшения величины трибо-ЭДС.

2. Обеспечение заданного ресурса всех пар трения МКС с СПД может быть достигнуто путем применения специального материала, сочетающего в себе высокие механические характеристики и износостойкость во всем диапазоне рабочих температур, нагрузок и скоростей используемых пар трения. Уровень ресурса 10000 часов обеспечивается композицией на основе фенилона и комплексного наполнителя (фторопласт-4, графит, дисульфид молибдена и медь), которая обладает надмолекулярной структурой, позволяющей сохранять высокие и стабильные механические характеристики и износостойкость.

Практическая ценность. Разработанный САМ, обладающий повышенной износостойкостью при сухом трении в среде криоагента

(гелия), обеспечивает ресурс пар трения МКС с СПД на уровне 10000 часов. Состав САМ гелищен АС № 1058273, внедрение осуществлено при изготовлении опытных образцов МКС. Методики и рекомендации, разработанные в ходе исследований, использованы в конструкторской и технологической документации опытных и экспериментальных образцов МКС.

Создано испытательное оборудование, позволяющее исследовать пары трения в заданной газовой среде в широком диапазоне скоростей и нагрузок.

Внедрение результатов исследований. Микрокриогенные системы с разработанными парами трения использованы на ЦНПО "Комета" (г.Москва) для криостатирования элементов РЭА.

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены на Всесоюзной НТК "Трение и изнашивание композиционных материалов" (г.Гомель, 1982 г.), 5-ой Республиканской конференции по высокомолекулярным соединениям (г.Донецк, 1984), 2-ой Всесоюзной НТК "Высоконаполненные композиционные материалы, развитие их производства и применение в народном хозяйстве" (г.Москва, 1984 г.), III Всесоюзной НТК "Криогенная техника-82" (г.Балашиха, октябрь 1982 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 12 печатных работ в периодических изданиях, тезисы докладов на 3-х конференциях, получены 3 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 188 стр. машинописного текста, содержит 50 рисунков, 27 таблиц и состоит из введения, пяти глав, списка литературы (168 наименований) и приложения (на I листе).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ литературных данных по надежности МКС, предназначенных для криостатирования элементов РЭА в составе объектов, относящихся по условиям эксплуатации к невосстанавливаемым, позволил определить необходимость и перспективность повышения ресурса таких систем до уровня 10000 часов при высоких показателях вероятности безотказной работы. Установлено, что одной из основных проблем, решение которых определяет ресурс МКС в целом, является проблема повышения износостойкости пар трения.

Рядом конструктивных преимуществ обладают МКС, в которых генератором холода служит свободнопоршневой детандер с дрос-

сельным тормозом (МКС с СПД). Вопросам повышения ресурса пар трения, а также изучению влияния степени их износа на энергетические характеристики указанных систем и посвящена настоящая работа.

Таким образом, объектом исследования выбраны пары трения МКС с СПД, предназначенной для криостатирования объектов на уровне 77 К. Область эксплуатации пар определяется работой без смазки в среде криоагента — инертного газа (гелия) при $v = 0,09 \dots 1,8$ м/с и $p = 0,1 \dots 0,8$ МПа. Пары трения, входящие в конструкцию агрегатов МКС с СПД, показаны на рис.1. Следует отметить разнообразие функциональных назначений рассматриваемых пар: уплотняющие и направляющие элементы поршневых групп детандера и компрессора, зубчатые колеса редукторов, сепараторы подшипников качения и др. Имеющиеся в литературе данные по фрикционно-износным характеристикам известных САМ, приведены для различных условий эксплуатации и, в некоторых случаях, даже противоречивы. Практически также отсутствуют данные о зависимости между величиной износа пар трения отдельных агрегатов МКС с СПД с такими энергетическими характеристиками систем, как, например, полезная холодопроизводительность (Q_0) или эксергетический КПД (η_e). Анализ влияния изменения геометрических размеров отдельных элементов пар трения в процессе износа на изменение энергетических характеристик МКС с СПД показал следующее:

1. Наиболее сильное влияние на изменение энергетических характеристик МКС с СПД оказывает износ динамических уплотнений (рис.2).

2. Изменение геометрических размеров элементов динамических уплотнений приводит к повышенным перетечкам криоагента, уменьшению массы газа непосредственно участвующего в процессе получения холода и, как следствие, параметрическому отказу системы.

3. Износ таких элементов пар трения как зубчатые колеса, сепараторы подшипников качения и т.д. влияет на энергетические характеристики (потребляемую мощность) системы через увеличение потерь в механизмах движения отдельных агрегатов. Превышение предельно допустимых износов таких элементов приводит к полному функциональному отказу системы.

Для экспериментальной оценки износостойкости САМ были разработаны машина трения и специальные стенды, имитирующие условия работы различных пар трения МКС с СПД. Основная конструктивная особенность этих стендов и машины трения — возможность проведе-

ния испытаний в заданной газовой среде в интересующих нас диапазонах скоростей и нагрузок.

Сравнительным фрикционно-износным испытаниям была подвергнута группа САМ, работоспособных при сухом трении. Определялись интенсивность изнашивания ($\dot{V}$) и коэффициента трения (μ). Результаты испытаний приведены в табл.1. Испытания проводились на машине трения, как в среде воздуха, так и гелия при $p = 0,8$ МПа, $v = 0,75$ м/с. Материалом контртела служила сталь 45, HRC 46...48, $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм. САМ, предназначенные для использования в качестве материалов зубчатых колес редукторов газораспределителя и компрессора, испытывались на стендах, полностью имитирующих условия работы этих агрегатов МКС.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний САМ

Материал	Газовая среда			
	Воздух		Гелий	
	$\dot{V} \cdot 10^{10}$	μ	$\dot{V} \cdot 10^{10}$	μ
Ф4К15М5	$1,92 \pm 0,21$	0,35	$1,67 \pm 0,16$	0,33
Ф4С15М5	$5,25 \pm 0,67$	0,37	$6,83 \pm 0,74$	0,37
АФГМ	$5,36 \pm 0,51$	0,30	$4,31 \pm 0,46$	0,26
НАМИ-ФГМ	$3,80 \pm 0,48$	0,33	$6,70 \pm 0,84$	0,38
ВИЛАН-9	$3,28 \pm 0,45$	0,28	$4,23 \pm 0,36$	0,26
ПАМ-50	$2,64 \pm 0,27$	0,25	$1,35 \pm 0,24$	0,29
ПАМ-15	$6,72 \pm 0,97$	0,31	$11,90 \pm 1,31$	0,35

Опыт эксплуатации МКС рассматриваемого типа и близких аналогов показывает, что наряду с износостойкостью пар трения, сильное влияние на ресурс работы оказывает и степень загрязнения криоагента газовыделениями из САМ. Результаты газохроматографического анализа газовыделений из некоторых САМ при трении в среде криоагента приведены на рис.3

Исследование изменения микрогеометрии поверхности контртела в период приработки, позволило определить оптимальные шероховатости исходных поверхностей контртела для САМ на различной полимерной основе. Изучено также образование на дорожке трения пленок фрикционного переноса. В среде гелия наличие этих пленок, наблюдаемых даже визуально, их внешний вид и занимаемая площадь хорошо коррелируются с величиной интенсивности изнашивания САМ —

все САМ, обладающие сравнительно высокой износостойкостью (ПАМ-50, Ф4К15М5) образуют пленки переноса, а менее износостойкие (ПМ-15, ВИЛАН-9) пленок практически не образуют.

На протекание процессов, определяющих интенсивность изнашивания при сухом трении в инертной среде, существенное влияние оказывает и трибоэлектричество. Обращает внимание, что у САМ, обладающих сравнительно более высокой износостойкостью в гелии, после завершения приработки происходит стабилизация и уменьшение средних значений трибо-ЭДС более чем на порядок.

Обобщая результаты работы, проведенной на первом этапе, можно заключить, что для обеспечения повышенной износостойкости в парах трения МКС с СПД на фрикционном контакте, должен быть реализован комплекс трибохимических, трибоэлектрических и других процессов, подавляющих интенсивное разрушение материалов пары в условиях сухого трения в инертной среде. Результатом этих процессов является образование устойчивых пленок вторичных структур, защищающих от прямого взаимодействия материалы пары, сглаживание микронеровностей и уменьшение величины трибо-ЭДС в установившемся режиме трения. Сравнение скоростей изнашивания исследованных САМ с требуемыми скоростями изнашивания элементов пар трения МКС с СПД, позволяющими рассчитывать на обеспечение ресурса на уровне 10000 часов (в том числе с учетом возможной деградации энергетических показателей), показывает, что применение исследованной группы САМ может обеспечить ресурс различных пар на уровне от 3000 до 6000 часов. Таким образом, решение задачи создания пар трения для МКС с СПД с ресурсом на уровне 10000 часов потребовало создания САМ, интенсивность изнашивания которого в 2,0-2,5 раза ниже, чем у рассмотренных выше. Представлялось перспективным создание одного материала, способного обеспечить ресурс всем парам трения МКС с СПД на уровне 10000 часов. Условия нагружения, а также сравнительно невысокие рабочие температуры рассматриваемых пар трения (максимальная $T_p = 403$ К) предопределили возможность использования в качестве связующих для такого материала термостойких полимеров, у которых температура, соответствующая началу существенного ухудшения механических свойств, значительно выше максимальной рабочей в парах трения. Анализ физико-механических характеристик известных термостойких полимеров и их технологичности при переработке, позволили выделить для дальнейших исследований два термостойких связующих: эпоксикремнийорганическую смолу Т-III (реактопласт) и ароматический полиамид-фенилон

(термопласт). Для обеспечения высокой износостойкости в условиях работы пар трения МКС с СПД, одним из необходимых условий является образование в зоне фрикционного контакта "третьего тела". В рассматриваемом нами случае - сухое трение в инертной среде, в роли "третьего тела", очевидно, должны выступать пленки вторичных структур, образованные из компонентов САМ при взаимодействии с материалом контртела. Учитывая, что марки связующих нами определены, а в качестве материала контртела была принята сталь 45, НКС 46...48, возникла необходимость выбора наполнителя и оптимизации количественного состава САМ.

Анализ литературы позволил выделить ряд наполнителей, наиболее подходящих для включения в состав САМ. Предварительные эксперименты по оценке работоспособности отобранных наполнителей проводились с композициями на основе смолы Т-III. Результаты испытаний отдельных композиций приведены на рис. 4. Наиболее высокую износостойкость и стабильный коэффициент трения показали композиции с комплексным наполнителем (мелкодисперсный, до 40 мкм, АФГМ и медный порошок ПМС-1), который и использовали в дальнейших исследованиях. Результаты фрикционно-износных испытаний САМ на основе фенилона приведены в табл. 2, из которой следует, что износостойкость сильно зависит от содержания наполнителя, а также то, что в рассматриваемом интервале концентраций наполнителей имеется оптимум, соответствующий наиболее высокой износостойкости.

Таблица 2
Результаты фрикционноизносных испытаний композиций
на основе фенилона С-2 в среде гелия

№	Наполнитель	$\gamma \cdot 10^{10}$	№	Наполнитель	$\mu \cdot 10^{10}$
1.	15%АФГМ+10%ПМС-1	2,15	3	30%АФГМ+10%ПМС-1	0,45
2	25%АФГМ+10%ПМС-1	0,6	4	40%АФГМ+10%ПМС-1	1,2

Оптимизация состава материала по износостойкости проводилась на основе математического планирования эксперимента. Область оптимизации описывалась уравнением второго порядка:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (I)$$

Оптимальный состав определялся для композиции на основе фенилона, как наиболее износостойкой из композиций на основе двух выбранных

связующих. В качестве независимых факторов принимались концентрации АФГМ (дисперсность ≤ 40 мкм) — X_1 и медного порошка ПМС-1 — X_2 . Уровни варьирования: для АФГМ 25 % и 30 %, для ПМС-1 — 4 % и 10 %. Экспериментальная часть выполнялась на машине трения при следующих условиях: $v = 0,75$ м/с, $p = 0,8$ МПа, время испытаний — 26 часов.

После реализации эксперимента, вычисления значений коэффициентов регрессии и проверки их значимости получили адекватное уравнение вида:

$$y = 5,29 - 0,33 x_1 - 0,17 x_2 + 0,57 x_1^2 + 0,12 x_2^2 \quad (2)$$

Коэффициенты точки оптимума в кодированных значениях получены решением системы уравнений, являющихся производными уравнения (2) по X_1 и X_2 . После перевода кодовых значений в натуральные был определен оптимальный состав, соответствующий минимальному износу: АФГМ — 29,2 %, ПМС-1 — 7,9 %, фенилон — остальное. Надмолекулярная структура, соответствующая композиции оптимального по износостойкости состава — кристаллическая структура с плотной упаковкой глобул и равномерным распределением наполнителя. Исследование выполнялось на электронном микроскопе УЗВМ-100 К. Стабильность физико-механических характеристик материала в области рабочих температур пар трения МКС СПД подтверждалась путем снятия термомеханических кривых на приборе ТМК-ПТА и методом термогравиметрического анализа на дериватографе системы Паулик-Паулик-Эрдей.

Для полноты информации об интенсивности изнашивания методом математического планирования была построена интерполяционная модель в области факторного пространства, ограниченной значениями v от 0,3 м/с до 1,2 м/с (X_1) и p от 0,2 МПа до 1,4 МПа (X_2).

Исследуемая область факторного пространства описывалась моделью второго порядка (1). Экспериментальная часть выполнялась на машине трения. После обработки экспериментальных данных, проверки значимости коэффициентов и адекватности получаем уравнения вида:

$$y = 6,6 + 1,5 x_1 + 5,7 x_2 - 1,4 x_1^2 + 2,4 x_2^2 \quad (3)$$

Для геометрической интерпретации поверхности отклика (рис.5) это уравнение было приведено к каноническому виду. Полученные из уравнения регрессии расчетные величины хорошо коррелируются с экспериментальными данными и могут быть использованы для оценки износостойкости разработанной композиции в парах трения МКС с СПД.

В результате исследования газовыделений при трении из разра-

ботанной композиции определено, что они значительно меньше газовыделений из промышленных САМ на основе фторопласта-4 и некоторых других полимеров. Особенно резко снижена концентрация CO_2 .

Необходимость реализации для обеспечения высокой износостойкости пар трения МКС с СПД определенного комплекса процессов, подтвердилась при исследовании трения композиции оптимального состава. Наличие пленок вторичных структур на дорожке трения стального контртела определялось на растровом электронном микроскопе (ув.15000). Дорожка трения стального образца после 6 часов работы с композицией оптимального состава на 90 % поверхности покрыта пленкой. Наблюдается хорошее адгезионное взаимодействие пленки с металлической подложкой. Пленка снимается только механическим воздействием, причем отделяется вместе с частицами металла. Сглаживание микронеровностей стального контртела при работе композиции оптимального состава в среде гелия подтверждено профилограммами, снятыми на разных этапах наработки, а снижение величины трибо-ЭДС в установившемся режиме трения до значений близких к нулю, характерно для всей группы материалов на основе фенилона и комплексного наполнителя (АФГМ+ПМС-1).

На завершающем этапе работы проводилось экспериментальное подтверждение соответствия ресурса пар трения МКС с СПД с разработанным САМ уровню 10000 часов.

В ходе ресурсных испытаний макета МКС с СПД было определено следующее:

1. Потеря полезной холодопроизводительности за время наработки более 5000 часов незначительна и находится в допустимых пределах.

2. Контроль параметров системы (рабочих давлений, давления заправки, потребляемой мощности и др.), а также ревизия пар трения микродетандера и газораспределителя показали, что они находятся в работоспособном состоянии и гарантированно сохраняют его до наработок порядка 10000-11000 часов.

3. Использование разработанного САМ уменьшило степень загрязнения хладагента и, как следствие, обеспечило стабильное поддержание температуры криостатирования на заданном уровне.

Длительные (5-20 тыс.час.) испытания элементов пар трения из разработанного материала в составе компрессоров были проведены в ГИИ им. В.И.Ленина (г.Тбилиси). Результаты испытаний подтвердили соответствие материала предъявляемым требованиям.

Объем статистических данных, накопленный при проведении испытаний, позволил не только подтвердить достижение всеми рассматриваемыми парами ресурса на уровне 10000 часов, но и произвести расчетную оценку их вероятности безотказной работы.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования триботехнических свойств известных материалов позволили установить, что для обеспечения повышенной износостойкости пар трения МКС с СПД на фрикционном контакте должен реализовываться определенный комплекс триботехнических, трибоэлектрических и других процессов, подавляющих интенсивное разрушение материалов пар в условиях сухого трения в среде криоагента.

2. Оптимальный состав композиции, обеспечивающий ресурс парам трения на уровне 10000 час, по физико-механическим характеристикам соответствует содержанию АБГМ (дисперсность 40 мкм) – 29 % и медного порошка ПМС-1 – 8 %.

3. Наиболее совершенной надмолекулярной структурой, обеспечивающей высокую износостойкость и прочность, является структура композиции оптимального состава – кристаллическая структура с плотной упаковкой глобул и равномерным распределением наполнителя.

4. Основной причиной ухудшения энергетических характеристик МКС с СПД является износ элементов динамических уплотнений, влияющих на холодопроизводительность через увеличение перетечек криоагента и, как следствие, уменьшение массы газа непосредственно участвующего в процессе получения холода, и отклонение характеристик термодинамического цикла от их оптимальных значений.

5. Полученная интерполяционная модель, связывающая интенсивность изнашивания работоспособного САМ с режимами эксплуатации, позволяет прогнозировать ресурс пар трения МКС с СПД.

6. Применение разработанного САМ снижает загрязнение криоагента продуктами газоразделений при трении, улучшает условия работы регенератора микродетандера и понижает вероятность возникновения отказов, вызываемых наличием примесей в криоагенте.

7. Использование разработанной композиции в качестве материала элементов динамических уплотнений, позволяет сохранить в допустимых пределах перетечки криоагента между полостями с различными рабочими давлениями. Тем самым поддерживается на требуемом уровне полезная холодопроизводительность МКС с СПД в течение

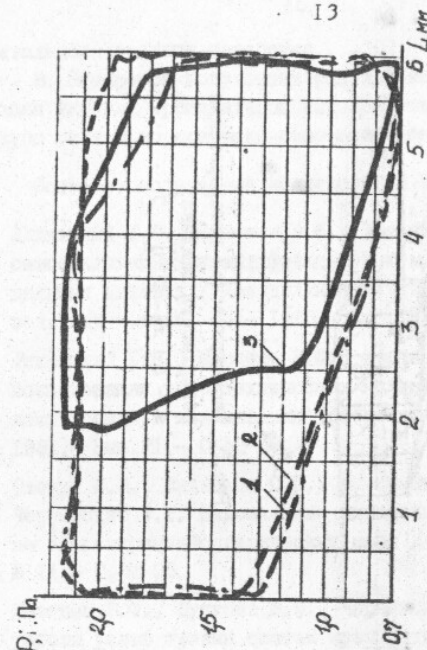


Рис. 2. Изменение индикаторной диаграммы микродетандера в зависимости от величины перетечки через уплотнение поршня при приведенном зазоре в уплотнении: 1-2 мкм; 2-4 мкм; 3-8 мкм.

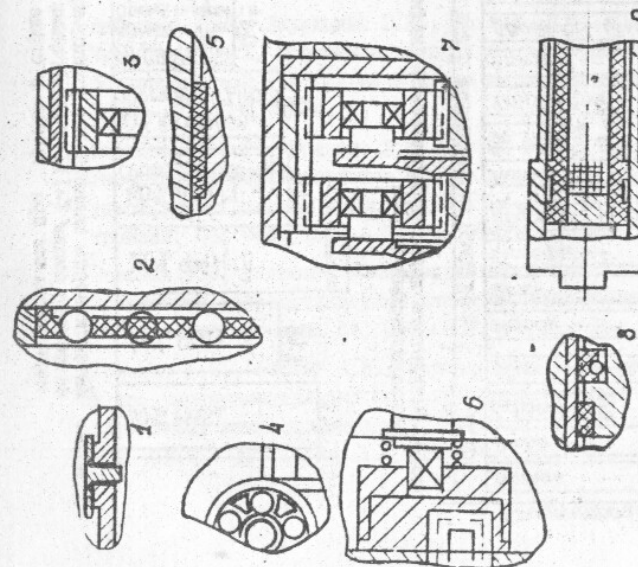


Рис. 1. Пара трения МКС с СПД: 1, 2, 3, 4 – компрессора; 5, 6, 7 – газораспределителя; 8, 9 – микродетандера

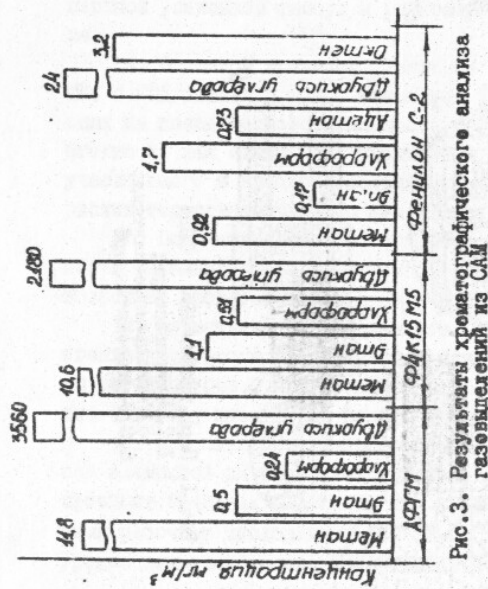


Рис.3. Результаты хроматографического анализа газоразделений из САМ

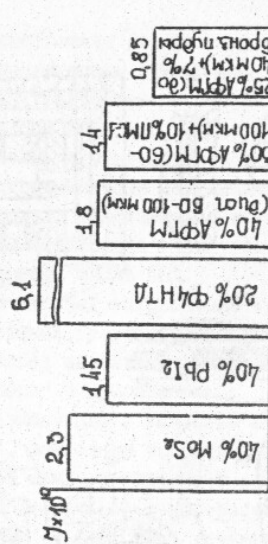


Рис.4. Интенсивность изнашивания композиций на основе смолы Т-III с различными наполнителями при трении в среде гелия

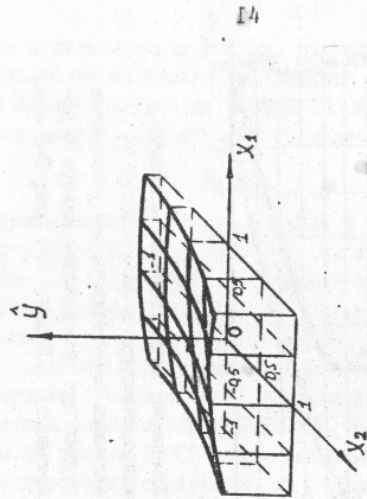


Рис.5. Геометрическая интерпретация поверхности отливки, $x_1 - \bar{x}_1, x_2 - \bar{x}_2, y - \bar{y}$

длительного времени наработки.

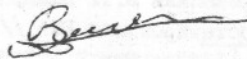
8. Внедрение полученных результатов в разработку опытных образцов МКС для криостатирования РЭА позволило обеспечить заданный ресурс систем по критерию износостойкости.

Основное содержание исследования опубликовано в работах:

1. Лихницкий Г.В., Моисеев В.Ф., Чернавский В.Т. Работоспособность самосмазывающихся антифрикционных материалов в газовых холодильных машинах // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. научн.техн. сб.- 1980.- Вып.31.- С.48-51.
2. Лихницкий Г.В., Моисеев В.Ф., Чернавский В.Т. Установка для исследования триботехнических явлений при сухом трении // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб.- 1981.- Вып.21.- С.53-56.
3. Олещук В.И., Живницкая С.П., Анисимов Ю.Н., Моисеев В.Ф., Чернавский В.Т. Наполненные антифрикционные компаунды на основе эпоксикремнийорганических смол // Пластические массы.- 1980.- № 11.- С.34-35.
4. Моисеев В.Ф., Пучкова В.Н., Чернавский В.Т. Повышение ресурса работы узлов трения систем криостатирования РЭА // Вопросы радиоэлектроники: Сб. Сер. ТРТО.- 1983.- Вып.1.- С.30-35.
5. Анисимов Ю.Н., Лихницкий Г.В., Моисеев В.Ф., Олещук В.И., Чернавский В.Т. Повышение долговечности поршневой группы свободнопоршневой ГДМ // Химическое и нефтяное машиностроение.- 1983.- № 6.- С.23-24.
6. Бортковский Ю.Р., Моисеев В.Ф., Рыбин В.К., Чернавский В.Т. Расчетно-экспериментальное определение показателей надежности узлов трения систем криостатирования РЭА // Вопросы радиоэлектроники: Сб. Сер. ТРТО.- 1984.- Вып.3.- С.88-93.
7. Моисеев В.Ф. Надежность микрокриогенных систем со свободнопоршневыми микродетандерами для криостатирования РЭА // Вопросы радиоэлектроники: Сб. Сер. ВСР.- 1986.- Вып. 10.- С.26-31.
8. Головач Р.Н., Кислый А.Н., Мартыновский А.В., Моисеев В.Ф. и др. Экспериментальная микрокриогенная система со свободнопоршневыми микроохладителями // Вопросы радиоэлектроники: Сб. Сер. ТРТО.- 1979.- Вып.1.- С.69-74.

9. Микрорефрижераторная система на базе свободнопоршневых микроохлаждавателей с дроссельным тормозом /Моисеев В.Ф. и др. //Тезисы докл. научн.-техн. конф. "Криогенная техника-82".- М., 1982.- С. 155
10. А.с. 1031993 СССР. Антифрикционная полимерная композиция /В.И.Олещук, Ю.Н.Анисимов, В.Ф.Моисеев, С.М.Витчинова, В.Т.Чернавский.- Оpubл. в Б.И., 1983, № 28.
11. А.с. 1058273 СССР. Антифрикционная полимерная композиция /С.М.Витчинова, В.Ф.Моисеев, В.Т.Чернавский, Ю.Н.Анисимов, В.И.Олещук.- Оpubл. в Б.И., 1983, № 44.

Условные обозначения: v - скорость скольжения, p - номинальное давление на контакте, Q_0 - полезная холодопроизводительность, η_e - эксергетический КПД, J - интенсивность изнашивания, μ - коэффициент трения, HRC - твердость по Роквеллу, R_q - параметр микрогеометрии поверхности, H_n - микротвердость.



XV 1235

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БИБЛИОТЕКА