

Автореферат  
Т 48

проф. Гушаку И. С.

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГЕТИКИ

Для служебного пользования  
Экз. № 001049  
На правах рукописи

Ткачев Сергей Петрович

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 05.14.05 - теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

УВМ - ЗИИТ

Одесса - 1989

Владимир  
Горюшко

Львов

Б. Хмельский

157

Тел. 71-21  
71-81

Великий  
Князь

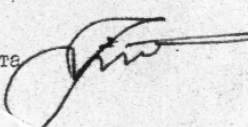
Работа выполнена в научно-исследовательском институте "Шторм"

- Научный руководитель - - доктор технических наук,  
профессор  
Смирнов Г.Ф.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор  
Бурдо О.Г.  
  
кандидат технических наук,  
доцент  
Сасин В.Я.
- Ведущая организация - Научно-исследовательский  
институт точных приборов  
(г.Москва)

Защита состоится "26" февраля 1990 г. в 11:00 час.  
на заседании специализированного Совета К.066.27.01 при Одесском  
институте низкотемпературной техники и энергетики по адресу:  
270057, Одесса, ул.Петра Великого, 1/3, ученый Совет ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИНТЭ.  
Автореферат разослан "3" февраля 1990 г.

Секретарь  
Совета

  
Р.К.Никольшин

Печатано к печати 28.12.89.  
№ 9-89.

240

XV1281  
ИНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
Библиотека

Актуальность проблемы. Промышленное применение низкотемпературных тепловых труб (НТТ) для обеспечения теплового режима радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях миниатюризации элементной базы, повышения плотности ее компоновки, возрастающих требований к функциональным и эксплуатационным характеристикам аппаратуры требует создания конструкций НТТ, в которых сочетаются эффективные теплопередающие характеристики, заданная стабильность параметров теплоносителя при длительной эксплуатации и низкая стоимость.

Для выполнения этих требований перспективна разработка НТТ из ограниченно совместимых конструкционных материалов и теплоносителей, таких как нержавеющая сталь и вода, которые превосходят по технико-экономической эффективности НТТ из совместимых конструкционных материалов и теплоносителей, уступаая последним по стабильности тепло-технических характеристик из-за образования и накопления в них неконденсирующегося газа.

Закономерности процессов, определяющих изменение тепло-технических характеристик НТТ в реальных условиях эксплуатации, не установлены. Данные по ресурсным испытаниям недостаточны, противоречивы и несопоставимы из-за различий по технологии изготовления, конструктивных параметров НТТ, состава конструкционных материалов и теплоносителей, условий и методов испытаний. Методы прогнозирования ресурсных характеристик и методы ускоренных ресурсных испытаний, основанные на обобщенных экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации, соответствующих реальным, отсутствуют. Это сдерживает разработку и промышленное применение НТТ, удовлетворяющих требованиям к составным частям систем обеспечения теплового режима современных РЭС и определило актуальность настоящей диссертации.

Цель работы: Создание основ расчета ресурсных характеристик НТТ для обоснованного выбора их конструктивных и режимных параметров, а также технологических методов и методов ускоренных ресурсных испытаний при разработке и применении НТТ в системах обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры.

Научную новизну составили следующие основные результаты:

- экспериментальные ресурсные характеристики цилиндрических НТТ из нержавеющей стали и меди, изготовленных по базовой технологии и испытанных при различной величине теплового потока, плотности теплового потока на испарительной и конденсационной зонах и различных геометрических параметрах этих зон. В качестве теплоносителей НТТ из нержавеющей стали использованы вода, водный раствор ингибитора Г-2, водный раствор перекиси водорода. Теплоноситель НТТ из меди - вода:
- экспериментальные ресурсные характеристики НТТ из нержавеющей

стали, заправленных водным раствором ингибитора Г-2 и исследованных в составе теплопередающих устройств при механических и климатических воздействиях, характерных для испытаний на безотказность объектов РЭС;

- экспериментальное обоснование применимости модели "плоской" границы раздела пар - газ для описания теплотехнических характеристик НТТ, накапливающих газ в процессе длительной эксплуатации;

- физические представления и основанные на них математические модели, устанавливающие связь между скоростью роста температуры пара в газонаполненных НТТ, конструктивными, технологическими, режимными параметрами и условиями эксплуатации;

- расчетно-экспериментальный метод определения закономерностей ресурсных характеристик НТТ и методика ускоренных ресурсных испытаний НТТ.

Практическая ценность. Результаты экспериментальных исследований, сформулированные в работе физические представления и математические модели, устанавливающие связь между скоростью роста температуры пара, конструктивными, технологическими, режимными и эксплуатационными параметрами, позволили разработать расчетно-экспериментальный метод определения закономерностей ресурсных характеристик газонаполненных НТТ и метод ускоренных ресурсных испытаний, применение которых обеспечивает создание конструкций НТТ, удовлетворяющих требованиям по надежности составных частей современных и перспективных СОТР РЭС.

Разработанная расчетно-экспериментальная методика использована при создании вариантов конструкций НТТ из нержавеющей стали, заправленных водным раствором ингибитора Г-2 для СОТР модуля I-го уровня изделия с длительной наработкой при допустимом изменении температуры за время эксплуатации НТТ не более 5 К.

#### Научные положения.

1. В НТТ из нержавеющей стали с водой, в качестве теплоносителя, закономерности изменения температуры пара при длительной эксплуатации определяются скоростью образования коррозионного водорода по закону поверхностной диффузии и кинетикой накопления водорода на конденсационной зоне НТТ, связь которой с конструктивными, эксплуатационными параметрами и параметрами теплоносителя удовлетворительно описывается моделью "плоской" границы раздела пар-газ.

2. Закономерности изменения температуры пара при длительной эксплуатации в НТТ из нержавеющей стали с водным раствором ингибитора в качестве теплоносителя, определяются скоростью образования

коррозионного водорода по закону поверхностной диффузии на участке поверхности НТТ, незащищенном ингибитором от коррозии, и кинетикой накопления водорода на конденсационной зоне. Размер поверхности корродирующего участка НТТ может быть установлен на основе представлений о существовании характерной функциональной связи между температурой и ингибиторным эффектом, имеющей максимум ингибиторного эффекта.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИХП в 1986, 1987 гг.; Всесоюзной научно-технической конференции "Ресурсосберегающее оборудование на базе тепловых труб (Киев, 1987 г.); на выездных совещаниях подсекции "Тепловые трубы" Научного совета по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" АН СССР (Одесса, 1985, 1987 гг., Москва, 1986 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано шесть печатных работ, в том числе три авторских свидетельства, по одной заявке получено положительное решение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложений. Работа изложена на 201 стр. машинописного текста, содержит 25 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 70 наименований, приложение на 44 стр.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ известных работ, посвященных исследованиям теплотехнических характеристик НТТ при длительной эксплуатации. Рассмотрены результаты исследований влияния конструкции, технологии изготовления, условий эксплуатации на стабильность теплотехнических характеристик НТТ. Показано отсутствие надежных экспериментальных данных, пригодных для обобщения и определения ресурсных характеристик НТТ, изготовленных по базовой технологии.

Задачи исследований сформулированы на основании анализа литературных данных и требований промышленного применения НТТ по повышению стабильности теплотехнических характеристик и созданию НТТ с заданными требованиями по ресурсу.

Во второй главе разработаны модели, исходным положением которых являлось равенство скорости образования газа и скорости накопления газа на конденсационной зоне.

Скорость образования водорода в НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой, представлена зависимостью, полученной из условия роста окисной пленки по закону поверхностной диффузии

$$\frac{dM}{d\tau} = A F_i \tau^{-0.5} \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right) \quad (1)$$

Уравнение для скорости накопления неконденсирующегося газа в НТТ получено с учетом допущений модели "плоской" границы раздела пар - газ из уравнений теплопередачи в зоне конденсации НТТ, содержащей газ и без газа, уравнения состояния газа и зависимости, аппроксимирующей кривую насыщения водяного пара

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{MV(P_i - P_c)}{RT_c(T_i - T_c)} \left[ \frac{P_i D(T_i - T_0)}{T_i^2(P_i - P_c)} - \frac{T_i - T_0}{T_i - T_c} + 1 \right] \frac{dT}{d\tau} \quad (2)$$

Итоговое уравнение модели, основанное на законе сохранения массы газа и связывающее процессы теплообмена и коррозии в газонаполненных НТТ, получено с учетом размера корродирующей поверхности:

$$\frac{(P_i - P_c) MV \tau^{0.5}}{(T_i - T_c) RT_c F \left[ 1 - \frac{P_0(T_i - T_0)}{P(T_i - T_c)} \right]} \left[ \frac{P_i D(T_i - T_0)}{T_i^2(P_i - P_c)} - \frac{T_i - T_0}{T_i - T_c} + 1 \right] \frac{dT}{d\tau} = A \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right) \quad (3)$$

или

$$Z_i = A \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right). \quad (4)$$

Постоянные процесса образования  $A$  и  $B$  определяются при дополнении уравнения (3) зависимостью  $T_i = f(T_c)$ , полученной из эксперимента.

Система уравнений, описывающих изменение теплотехнических характеристик НТТ из нержавеющей стали с водным раствором ингибитора Г-2, получена на основе уравнения (2) и уравнения скорости образования газа по закону поверхностной диффузии на участках поверхности НТТ, незащищенных ингибитором.

Скорость образования газа представлена тремя стадиями, каждая из которых соответствует своему диапазону температур и эффективности защитного действия ингибитора, определяемой известным видом зависимости ингибиторного эффекта  $\gamma$  от температуры пара  $T$ .

Первая стадия соответствует диапазону температур до температуры максимума ингибиторного эффекта  $T_{кр1}$  и характеризуется увеличением ингибиторного эффекта и уменьшением размера корродирующей поверхности с ростом температуры за счет усиления хемосорбции. Увеличение температуры в пределах второй стадии сопровождается ростом корродирующей поверхности за счет десорбции ингибитора, процесс которой завершается при достижении температуры максимума ингибиторного эффекта  $T_{кр2}$ . На третьей стадии при темпе-

ратуре больше  $T_{кр2}$  защитные свойства Г-2 исчерпаны и процесс образования газа протекает на всей поверхности так же, как в НТТ без ингибитора.

Скорость образования газа на первой стадии на участках поверхности, незащищенных ингибитором, размер которых в  $\gamma$  раз меньше полной внутренней поверхности НТТ  $F_{u1} = F_i / \gamma$ .

$$\left(\frac{dM}{d\tau}\right)_1 = A F_{u1} \tau^{-0.5} \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right). \quad (5)$$

С учетом доли поверхности, блокированной адсорбированным ингибитором  $\theta_i = A_{0g} \exp\left(-\frac{B_{0g}}{T_i}\right)$ , размер которой связан с ингибиторным эффектом соотношением  $\gamma_i = 1/(1 - \theta_i)$ , и поверхности, занятой неконденсирующимся газом, получено уравнение

$$Z_i = [1 - A_{0g} \exp\left(-\frac{B_{0g}}{T_i}\right)] A \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right) \quad (6)$$

Данные для определения неизвестных постоянных этого уравнения  $A_{0g}$  и  $B_{0g}$  и установления температурной зависимости ингибиторного эффекта получают из эксперимента в виде функции  $T_i = f(T_c)$ .

Скорость образования газа на второй стадии представлена суммой скоростей образования газа на поверхности  $(F_{u2})_{min}$ , соответствующей  $T_{кр1}$  и поверхности  $F_{u2i}$ , освобожденной от защиты ингибитора при  $T_i > T_{кр1}$

$$\left(\frac{dM}{d\tau}\right)_{2i} = \left(\frac{dM}{d\tau}\right)_{F_{u2i}min} + \left(\frac{dM}{d\tau}\right)_{F_{u2i}} \quad (7)$$

С учетом десорбции Г-2 при увеличении температуры и изменения размера корродирующей поверхности по зависимости вида  $F_{u2i} = F_{max} \frac{Q}{P_{0g}} \tau_{2i}^p$ , получено уравнение, описывающее изменение теплотехнических характеристик НТТ на второй стадии

$$Z_i = [1 - A_{0g} \exp\left(-\frac{B_{0g}}{T_{кр1}}\right)] A \exp\left(-\frac{B}{T_i}\right) + \tau_i^{0.5} \tau_{2i}^{p-0.5} A_{0g} \exp\left(-\frac{B_{0g}}{T_{кр1}}\right) A_{u2} \exp\left(-\frac{B_{u2}}{T_i}\right) \quad (8)$$

Постоянные процесса  $A_{u2}$  и  $B_{u2}$  показатель степени  $p$  определяются при совместном решении уравнения (8) и уравнения  $T_i = f(T_{2i})$ , получаемого из эксперимента при  $T_i > T_{кр1}$ .

Скорость образования газа в НТТ, температура пара в которой превысила  $T_{кр2}$ , равна скорости образования газа в НТТ без ингибитора и итоговое уравнение для третьей стадии имеет вид зависимости (3).

В третьей главе приведено описание экспериментальных установок, многолетние исследования и выполнен анализ погрешности измерений. Закономерности ресурсных характеристик цилиндрических НТТ исследованы на стенде ресурсных испытаний, схема которого показана на рис. I.

Схема стенда ресурсных испытаний тепловых труб

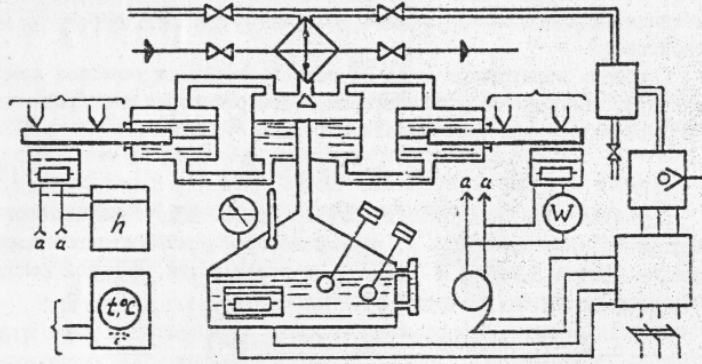


Рис. 1

На стенде исследованы ресурсные характеристики НТТ, изготовленных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и меди. Количество исследованных НТТ, геометрические параметры, диапазон фиксированных тепловых потоков и рабочих температур приведен в табл. I.

Исследования ресурсных характеристик НТТ при воздействиях характерных для испытаний на безотказность проведены семнадцатью циклами, каждый из которых включал ударные и вибрационные воздействия, работу при повышенной, пониженной температуре и в нормальных климатических условиях.

Экспериментальная проверка применимости модели "плоской" границы раздела пар - газ при накоплении газа в НТТ проведена двумя независимыми методами. По первому методу в НТТ дозировалась известная масса газа и при заданном тепловом потоке и температуре охлаждающей жидкости измерялась температура на стенке и в паровом канале в различных зонах НТТ. Во втором варианте для определения массы газа использован хроматографический анализ состава и количества газа извлеченного из НТТ, отработавших до заданной температуры и снятых со стенда ресурсных испытаний. После отбора газа проводился анализ продуктов коррозии на поверхности металла и в теплоносители.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, их анализ и обсуждение.

Результаты исследования влияния массы газа на температуру пара при различной величине теплового потока и температуре охлажда-

Таблица I

Основные параметры исследованных НТТ

Количество шт.	Геометрические параметры			Длина конденсационной зоны, м		Материал	Теплоноситель	Тепловой поток, Вт	Условия работы	Диапазон рабочих температур, К	Наработка, ч
	Диаметр, мм	Длина, мм	Толщина, мм	Испарительной зоны, м	Теплоносительной зоны, м						
26	0,01	-	0,3	0,03-0,1	0,022-0,102	Сталь 12Х18Н10Т	Вода	36-95	$T_c = 323$ К испарительное охлаждение	339-443	21560
17	0,01	-	0,3	0,03-0,06	0,02-0,102	Сталь 12Х18Н10Т	Водный раствор ингибитора Г-2	75-90	$T_c = 323$ К испарительное охлаждение	340-443	24280
5	0,01	-	0,3	0,06	0,102	Сталь 12Х18Н10Т	Водный раствор перекиси водорода	73-75	$T_c = 323$ К	348-373	15950
4	0,01	-	0,3	0,115	0,012-0,102	Сталь 12Х18Н10Т	Этанол	15-17	$T_c = 323$ К испарительное охлаждение	330-354	12350
6	0,01	-	0,25	0,05-0,1	0,02-0,05	Медь	Вода	53-83	$T_c = 323$ К испарительное охлаждение	330-354	26110
6	-	0,04	0,0024	0,15	0,054	Сталь 12Х18Н10Т	Водный раствор ингибитора Г-2	25,40	$T_c = 233-313$ К вздушное охлаждение скорость потока 2 м/с $\dot{q} = 3-500$ Вт/м <sup>2</sup> $g = 147$ м/с <sup>2</sup>	285-368	15000

щей среды представлены на рис.2 в виде зависимостей  $T_i = f(M_i)$ . Удовлетворительная сходимость результатов расчета и экспериментальных данных при различных режимных и конструктивных параметрах, подтверждает применимость модели "плоской" границы раздела пар-газ.

Для НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой, на рис.3-4 представлены характерные зависимости температуры пара от наработки при различных режимных и конструктивных параметрах НТТ. Во всех случаях с увеличением наработки температура пара монотонно возрастала с убывающей во времени скоростью. Общая закономерность изменения температуры во времени имела вид  $T_i = T_0 + \alpha \tau^{0,5}$ .

Хроматографический анализ состава и количества газа, извлеченного из НТТ, отработавших назначенный ресурс, а также анализ твердых продуктов коррозии и растворенных в теплоносителе показал, что причиной изменения теплотехнических характеристик НТТ был коррозионный водород.

Обобщение результатов экспериментальных исследований ресурсных характеристик НТТ единой температурной зависимостью вида  $\ln Z_i = f(t/t_i)$  с максимальной погрешностью  $\ln Z_i$ , равной 0,02, выполненное на основе математической модели, подтвердило справедливость допущений диффузионной модели, принятой для описания процесса образования газа и модели "плоской" границы раздела пар-газ для описания накопления газа на конденсационной зоне (рис.5). Постоянные скорости процесса образования водорода для НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой составили  $A = 1,31$ ,  $B = 6552$ .

Для НТТ из нержавеющей стали, заправленной водой ингибитором Г-2 экспериментально установлено существование трех групп ресурсных характеристик с различным законом изменения температуры пара во времени, общим для которых было возрастание температуры пара с увеличением наработки. При этом скорость роста температуры пара у ресурсных характеристик первой группы уменьшалась, второй - увеличивалась и у третьей уменьшалась (рис.6).

Характеристики первой группы аппроксимированы зависимостью  $T_i = T_0 + \alpha_{ин} \tau_{ин}^{0,5}$  с показателем степени  $\alpha_{ин} = 0,5$  и обобщены в виде зависимости ингибиторного эффекта от температуры (рис.7), постоянной которой составили  $A_{ог} = 1,65$  и  $B_{ог} = 190$ .

Переход от функции  $T_i = f(\tau_i)$  с убывающей скоростью роста температуры пара, а, следовательно, уменьшающейся скоростью коррозии, к возрастающей, происходил в диапазоне температур  $T_{кр1} = 373-383$  К, как вследствие образования и накопления газа, так и при изменении геометрических параметров или условий охлаждения конден-

Зависимость температуры пара от массы газа

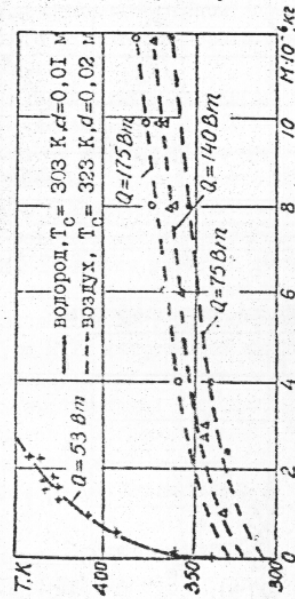
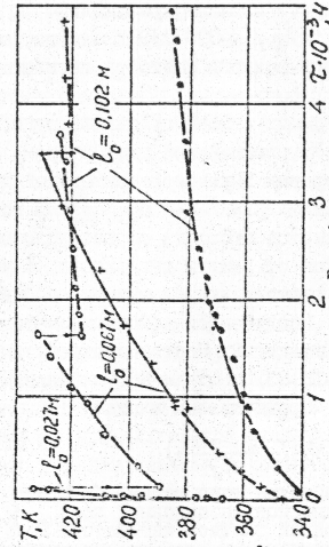


Рис. 2

Зависимость температуры пара от наработки при различной длине конденсационной зоны, (нержавеющая сталь - вода)



Зависимость температуры пара от наработки при различной величине теплового потока (нержавеющая сталь - вода)

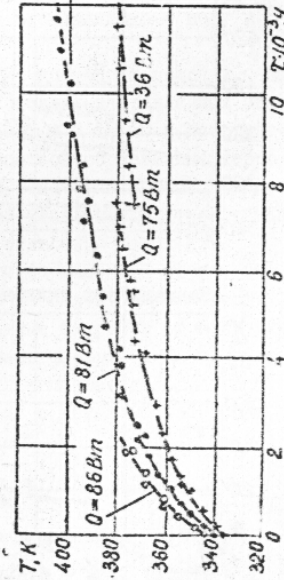


Рис. 3

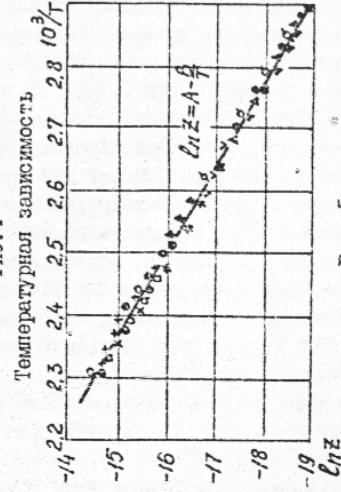


Рис. 5

сационной зоны, то есть независимо от причины превышения  $T_{кр1}$ . Следовательно, диапазон температур  $T_{кр1} = 373-383$  К соответствует максимуму ингибиторного эффекта для водного раствора ингибитора Г-2 с концентрацией 0,7-1,0 %.

При температурах, соответствующих максимуму ингибиторного эффекта ( $\gamma_{max} > 100$ ) доля поверхности, защищенной ингибитором, стремится к единице. Поэтому для ресурсных характеристик второй группы, аппроксимированных зависимостью вида  $T_i = T_{кр1} + a_{u2} \tau_{u2}^{b_{u2}}$  с коэффициентом  $b_{u2} = 2$ , определяющей является скорость образования водорода на поверхности, освободившейся от защиты ингибитора. С учетом этого положения ресурсные характеристики второй группы обобщены зависимостью вида  $\ln Z_u = f(1/T_i)$ , полученной на основе математической модели, разработанной для стадии 2. Постоянные зависимости  $\ln Z_u = f(1/T_i)$  равны  $A_{u2} = \exp(-10,83)$  и  $b_{u2} = 6667$ . Зависимость ингибиторного эффекта для  $T > T_{кр1}$  представлена в виде

$$\gamma_{2i} = \tau_{2i}^{-1,5} A \cdot A_{u2}^{-1} \exp\left(-\frac{\beta - \beta_{u2}}{T_i}\right) \quad (9)$$

Зависимость температуры пара от наработки при различной длине конденсационной зоны (нержавеющая сталь - водный раствор ингибитора Г-2)

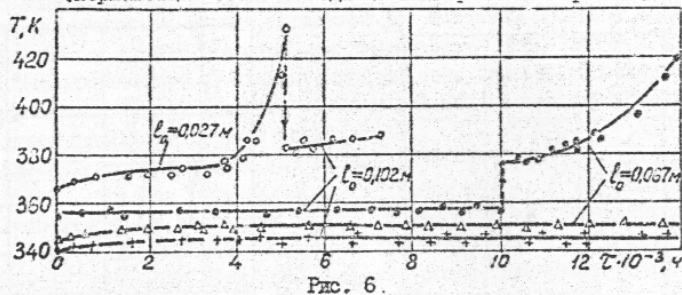
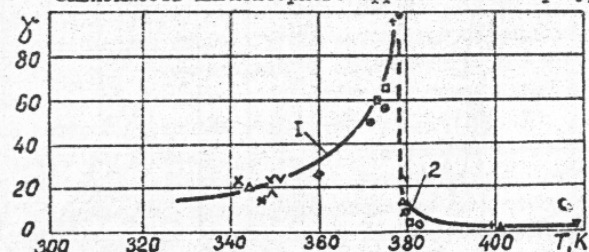


Рис. 6.

Зависимость ингибиторного эффекта от температуры



1 - стадия I; 2 - стадия II ( $\tau_2 = 400$  ч)

Рис. 7

Соответствие допущений, принятых при разработке математической модели на второй стадии экспериментальной функции  $T_i = f(\tau_i)$  и зависимости  $\gamma_{2i} = f(T_i)$  подтверждено данными исследований состояния поверхности НТТ, работавших при  $T > T_{кр1}$ .

Зависимости  $T_i = f(\tau_i)$  третьей группы, в которых были достигнуты  $T_{кр2}$  и  $\gamma_{min} = 1$  эквивалентны характеристикам НТТ без ингибитора в одинаковом диапазоне температур. Получено удовлетворительное совпадение результатов обобщения экспериментальных данных по зависимости  $\ln Z_i = f(1/T_i)$  для третьей группы и для НТТ без ингибитора.

В НТТ, испытанных при механических и климатических воздействиях, вид зависимости  $T_i = f(\tau_i)$  был таким же как у НТТ первой группы, которые не подвергались механическим воздействиям.

НТТ из нержавеющей стали с водным раствором перекиси водорода в качестве теплоносителя отличались уменьшением термического сопротивления при длительной эксплуатации. В таких НТТ после подачи нагрузки устанавливалась начальная температура пара, которая превышала на 19-21 К начальную температуру пара в НТТ, заправленных водой и соответствовала расчетному значению, полученному с использованием модели "плоской" границы раздела пар - газ при условии полного разложения перекиси водорода на составляющие - воду и кислород.

Теплотехнические характеристики НТТ, из меди с водой в качестве теплоносителя и НТТ из нержавеющей стали, заправленных этанолом, не изменились за время работы 26000 ч и 12000 ч, соответственно. Это подтвердило отсутствие процессов образования коррозионного водорода в НТТ из потенциально совместимых конструкционных материалов и теплоносителей, а также удовлетворяющее требованиям надежности качество технологии изготовления таких НТТ.

Методика определения ресурса НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой, разработана на основе математической модели. Ресурс НТТ, для которой известны постоянные скорости образования водорода, геометрические и режимные параметры при заданных условиях эксплуатации и предельно допустимой температуре пара рассчитывается в процессе решения уравнения (4) в конечных разностях. После замены  $dT = T_i - T_{i-1} = \Delta T$  и  $d\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ , а  $\tau_i^{a,5}$  на  $y$  уравнение (4) приводилось к уравнению

$$y^2 - Ky - \tau_{i-1} = 0 \quad (10)$$

в котором в комплекс  $K$  сведены члены уравнения (4), свободные от  $\tau$ . Значение  $\tau_i$ , соответствующее  $T_i$ , находилось из решения

уравнения (10) при заданном шаге  $\Delta T$ . Для расчета ресурсных характеристик разработана и реализована на ЭВМ ЕС-1055 программа МО7. Ресурс НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой с ингибитором Г-2, рассчитывался по программе МО7 с учетом зависимости ингибиторного эффекта от температуры.

Для определения соответствия НТТ заданным требованиям по ресурсу разработана методика ускоренных ресурсных испытаний. Наиболее близок к условиям при натурных испытаниях способ, при котором фронт скорости роста температуры пара достигнуто за счет уменьшения длины конденсационной зоны. Условия, при которых обеспечивался требуемый коэффициент ускорения  $K_y$ , находились из зависимости  $K_y = f(\dot{v}_{ог} / \dot{v}_{он})$ , полученной в результате расчетов  $\tau_y$ , соответствующих ряду произвольных значений  $\dot{v}_{ог} < \dot{v}_{он}$ . Расчетная наработка до предельного состояния проверялась экспериментально.

#### ВЫВОДЫ

1. Расширение промышленного применения НТТ в системах обеспечения теплового режима радиоэлектронных средств потребовало создания конструкций с водой в качестве теплоносителя, обладающих низким термическим сопротивлением и стабильностью теплотехнических характеристик, соответствующей требованиям по надежности к составным частям РЭС.

Применение НТТ из нержавеющей стали с водой в качестве теплоносителя сдерживалось из-за отсутствия теоретических основ и опыта проектирования тепловых труб с заданным изменением теплотехнических характеристик во времени, несовершенства методов прогнозирования теплотехнических характеристик таких НТТ для условий длительной эксплуатации, отсутствия методов проверки эффективности рекомендаций по оценке уменьшения влияния процессов, определяющих изменение теплотехнических характеристик НТТ.

2. Создание НТТ с ресурсом, требуемым по условиям эксплуатации в составе СОТР РЭС, возможно из нержавеющей стали с водой в качестве теплоносителя, а также с водой, содержащей замедлители коррозии - ингибитор Г-2 или перекись водорода. Выбор вида замедлителя в таких НТТ определяется требованиями конкретной системы обеспечения теплового режима по уровню рабочих температур, наработке до предельно допустимой температуры, массогабаритным ограничениям и условиям эксплуатации.

3. Изменение теплотехнических характеристик во времени НТТ из нержавеющей стали, заправленных водой, подчиняется единой за-

кономерности в диапазоне температур  $T = 333-443$  К, тепловых потоков  $Q = 36-95$  Вт, плотностей теплового потока на испарительной зоне  $q_{ис} = (4-8) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и на конденсационной зоне  $q_{о} = (2-10) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и определяется скоростью образования водорода, конструктивными, режимными параметрами и условиями эксплуатации НТТ.

4. Для НТТ из нержавеющей стали с водным раствором ингибитора Г-2 единая закономерность изменения теплотехнических характеристик во времени представляется тремя последовательными стадиями, определяемыми эффективностью защитного действия ингибитора Г-2 в диапазоне температур  $T = 340-443$  К, тепловых потоков  $Q = 24-90$  Вт, плотностей теплового потока на испарительной зоне  $q_{ис} = (2-14) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и на конденсационной зоне  $q_{о} = (2-10) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Изменение во времени теплотехнических характеристик таких НТТ определяется скоростью образования водорода в ингибированной среде, конструктивными параметрами и условиями эксплуатации.

Температура максимума эффективности защитного действия ингибитора Г-2, ниже которой расположен диапазон температур, соответствующий наибольшей стабильности теплотехнических характеристик, составляет  $T_{кр1} = 373-383$  К. Для этого диапазона температур определяющим является влияние факторов, связанных с уровнем температуры в НТТ. Механические воздействия в условиях испытаний на безотказность РЭС не оказывает влияния на стабильность теплотехнических характеристик НТТ.

5. Невозможность образования неконденсирующегося газа и удовлетворительное качество базовой технологии изготовления НТТ из совместимых конструкционных материалов подтверждается стабильностью температуры пара во времени для НТТ из меди с водой в качестве теплоносителя в диапазоне температур  $T = 330-354$  К, тепловых потоков  $Q = 53-83$  Вт, плотностей теплового потока на испарительной зоне  $q_{ис} = (2-4) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и на конденсационной зоне  $q_{о} = (2-3) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, а также для НТТ из нержавеющей стали с этанолом в диапазоне температур  $T = 330-354$  К тепловых потоков  $Q = 14-17$  Вт, плотностей теплового потока на испарительной зоне  $q_{ис} = (4-5) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и на конденсационной зоне  $q_{о} = (1-4) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

6. Для НТТ, изготовленных из нержавеющей стали и заправленных водным раствором перекиси водорода максимум термического сопротивления соответствует начальному значению и с увеличением времени работы обеспечивается улучшение теплотехнических характеристик в диапазоне температур  $T = 348-373$  К при  $Q = 75-76$  Вт.

7. Математические модели, устанавливающие взаимосвязь процессов образования и накопления неконденсирующегося газа с изменением теплотехнических характеристик, и разработанные на их основе методика определения ресурса и методика ускоренных ресурсных испытаний для НТТ из нержавеющей стали с водой или водным раствором ингибитора Г-2 в качестве теплоносителя позволяют прогнозировать изменение теплотехнических характеристик НТТ и проектировать НТТ с требуемым ресурсом.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гниличенко В.И., Мироненко Ю.П., Ткачев С.П. Надежность низкотемпературных тепловых труб при длительной эксплуатации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО.- 1985.- Вып.2.- С.54-55.

2. Ткачев С.П., Смирнов Г.Ф., Гниличенко В.И. Теплотехнические характеристики низкотемпературных тепловых труб при длительной эксплуатации и кинетика образования неконденсирующегося газа // Теплоэнергетика.- 1988.- № 3.- С.61-63.

3. Ткачев С.П., Гниличенко В.И., Ткачева Т.С. Определение ресурса тепловых труб // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР.- 1988.- Вып.3.- С.11-16.

4. А.с. 1183819 СССР. Тепловая труба /С.П.Ткачев, В.И.Гниличенко.- № 3671006/06; Заявлено 07.12.83; Опубл.17.10.85. Бюл.№ 37.

5. А.с. 1178172 СССР. Стенд для испытаний тепловых труб / С.П.Ткачев, В.И.Гниличенко, С.А.Тюрин, В.Г.Христофоров.- № 3683376/06; Заявлено 30.12.83.

6. А.с. 1385036. Способ коррозионных испытаний полых образцов /С.П.Ткачев, Г.Ф.Смирнов, В.И.Гниличенко, С.Г.Коротков.- № 4134300-28; Заявлено 16.10.86; Опубл. 30.03.88. Бюл. № 12.

#### Условные обозначения

$A, B, D$  - постоянные;  $\gamma$  - ингибиторный эффект;  $d$  - диаметр;  $F$  - площадь поверхности НТТ;  $F_g$  - площадь поверхности НТТ, защищенная ингибитором;  $F_u$  - площадь поверхности, незащищенная ингибитором;  $l$  - длина НТТ;  $l_o$  - длина конденсационной зоны НТТ;  $M$  - масса газа;  $\mu$  - молярная масса газа;  $P$  - давление насыщения пара;  $P_c$  - давление насыщения пара при температуре среды;  $Q$  - тепловой поток;  $q$  - плотность теплового потока;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - температура;  $\tau$  - время;  $V$  - объем парового канала конденсационной зоны;  $ad$  - адсорбция;  $г$  - газ;  $des$  - десорбция;  $диф$  - диффузия;  $и$  - ингибитор;  $ис$  - испарительная;  $кр$  - критическая;  $с$  - среда;  $у$  - ускоренные;  $н$  - натурные.