

К. т. н. В. М. БАТУРКИН

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”  
E-mail: baturkin@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
07.08—14.12 2006 г.

Оппонент к. т. н. А. Л. КОБА  
(ОГАХ, г. Одесса)

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО СТАНДАРТА PSS-49 ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОСПУТНИКА BIRD

*Рассмотрены основные аспекты проведения квалификационных испытаний алюминиевых тепловых труб с продольными канавками, предназначенных для использования в системе терморегулирования микроспутника.*

Широкое применение тепловых труб (ТТ) в системах терморегулирования (СТР) и теплового контроля космической аппаратуры обусловлено автономностью их функционирования, не требующей затрат энергии и использования механических приводов. Вполне достаточно относительно небольшого перепада температур, чтобы ТТ в условиях пониженной гравитации обеспечили передачу тепловых потоков на уровне 100—400 Вт·м (произведение передаваемого теплового потока и эффективной длины теплопередачи). При этом эффективность теплообменных процессов в ТТ в наиболее востребованном диапазоне рабочих температур (–60...+80°C) находится для зоны нагрева в пределах 2000—15000 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), а для зоны теплоотвода — 5000—20000 Вт/(м<sup>2</sup>·°C) [1—3].

Особенно часто в СТР космической аппаратуры применяются ТТ на основе алюминиевых сплавов. Кроме минимизации массы, это позволяет для получения продольных канавок различной конфигурации (прямоугольная, трапециевидная, омегаобразная и др.), являющихся капиллярной структурой ТТ, использовать такой высокопроизводительный метод как экструзия. Кроме того, этот метод дает возможность изготавливать ТТ с разнообразной формой сечения, что позволяет конструировать корпус ТТ в соответствии с решаемой задачей. Эти качества ТТ, а также малое термическое сопротивление (менее 0,1 °C/Вт), способствовали широкому применению ТТ как в СТР отдельных приборов, так и для конструирования тепловых сетей значительной протяженности (до 6 м) для обеспечения теплового режима космического аппарата.

В связи с этим чрезвычайно важным становится выполнение программ конструкторско-доводочных испытаний (КДИ), называемых также квалификационными испытаниями.

Для интеграции разработок лаборатории “Тепловые трубы” НТУУ “КПИ” в проекты Европейского космического агентства (ЕКА) обязательным является выполнение требований европейских стандартов,

регламентирующих программы и методики, используемые при разработках ТТ для космического приборостроения. Так, стандарт PSS-49 [4], разработанный в ЕКА, охватывает все аспекты производства ТТ: контроль исходных материалов, изготовление, очистку, заполнение, хранение и т. д., а также оценку наиболее очевидных эксплуатационных характеристик (поле температур, максимальный передаваемый тепловой поток, термическое сопротивление) и проведение комплексных испытаний, включающих механические (вибрация, ударные нагрузки) и климатические (термоциклирование, термоудар, влияние температуры хранения).

Принципиальное отличие между требованиями [4] и ранее использованными квалификационными программами, например для проектов “Венера—Галлей”, “Фобос” и др., заключается в применении более универсального подхода. Стандарт [4] рассматривает как объект испытаний ТТ различных конструкций — обычные, газорегулируемые и термодиоды. В нем определены особенности применения различных теплоносителей — таких как азот, метан, этан, аммиак, метанол, вода. Предлагаемый стандартом PSS-49 объем испытаний позволяет использовать ТТ в любых космических миссиях.

Опыт применения данного стандарта в странах СНГ весьма ограничен. Впервые в Украине он был применен в лаборатории «Тепловые трубы» (в 1997—1998 гг.) для квалификации ТТ с продольными канавками, которые были разработаны для системы терморегулирования немецкого технологического микроспутника BIRD [5]. Знакомство с наработками, полученными в упомянутом проекте, на наш взгляд, будет полезным широкому кругу разработчиков космического оборудования.

Разработка ТТ для СТР производится в последовательности, представленной на рис. 1. Приведенный алгоритм был типичным при разработке систем терморегулирования на основе ТТ для 12 научных космических миссий в рамках научной кооперации с Институтом космических исследований РАН (г. Москва, Россия) и СКБ космического приборостроения (г. Бишкек, Киргизия).

Основой для разработки является техническое задание, в котором определены условия эксплуатации, а также предложены соответствующие квалификационные программы и методики испытаний.

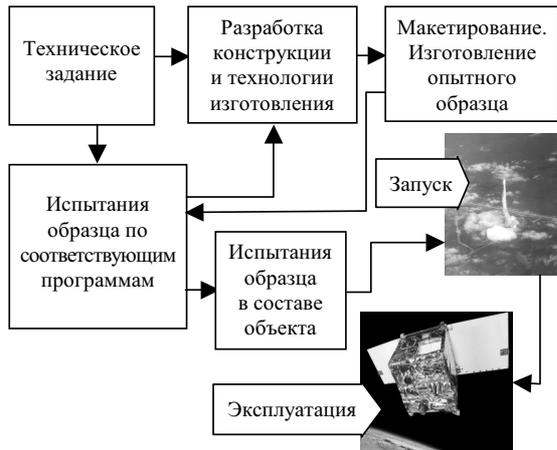


Рис. 1. Последовательность реализации разработки ТТ и СТР

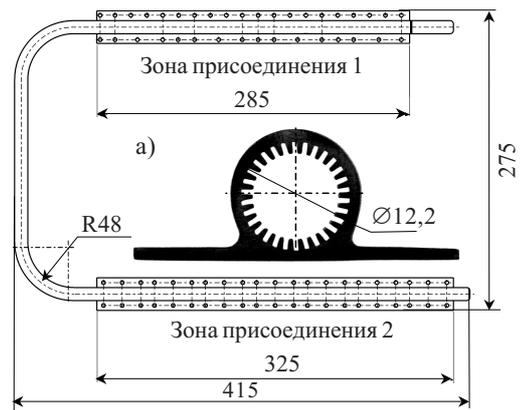


Рис. 2. Внешний вид и поперечное сечение (а) аммиачной тепловой трубы с продольными канавками

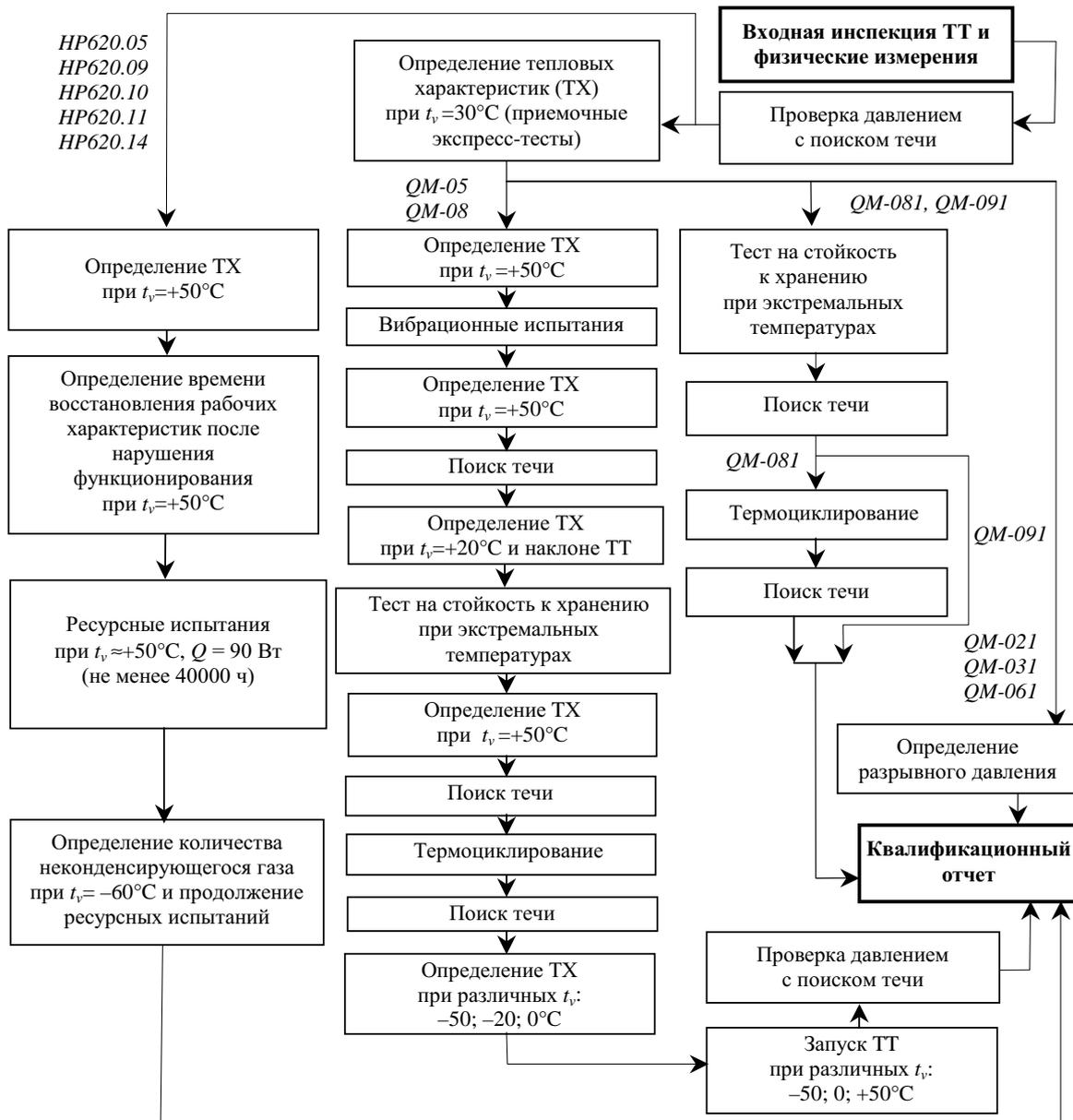


Рис. 3. Последовательность проведения квалификационных испытаний тепловых труб серий HP620 и QM

Объектом квалификационных испытаний являлись аммиачные тепловые трубы U-образной конфигурации (рис. 2), имеющие следующие основные параметры.

Диаметр оболочки, мм	12,2
Толщина стенки оболочки, мм	1
Длина зоны присоединения 1 к прибору, мм	285
Длина транспортной зоны, мм	344
Длина зоны присоединения 2 к радиатору, мм	325
Эффективная длина, мм	650
Материал оболочки	АД-31
Защита оболочки	полирование
Капиллярная структура	прямоугольные канавки
— глубина канавки, мм	1
— ширина в открытой части, мм	0,5
— ширина в закрытой части, мм	0,45
— количество канавок	30
Температура эксплуатации, °С	-40...+40
Термическое сопротивление, °С/Вт	менее 0,07
Тепловая нагрузка в составе СТР, Вт	не более 60
Масса, кг	менее 0,23

Основными тестами в соответствии с [4] являлись: контроль внешних дефектов, контроль размеров корпуса и капиллярной структуры; проверка герметичности и сохранения геометрии ТТ при повышенном внутреннем давлении с последующим контролем на наличие течей теплоносителя; исследование рабочих теплотехнических характеристик; определение давления разрыва оболочки; вибрационные испытания; тесты на хранение; термоциклирование; ресурсные испытания.

Исследования рабочих (теплотехнических) характеристик включали:

— определение термического сопротивления тепловых труб и максимального передаваемого теплового потока при различных значениях температуры испарения ( $t_v$ );

— исследование влияния угла наклона ТТ на величину максимального передаваемого теплового потока;

— определение поля температуры по длине ТТ в каждом из испытаний;

— определение времени восстановления работоспособности ТТ после осушения зоны подвода тепла;

— подтверждение способности запуска ТТ при различных значениях мощности теплового потока.

Климатические испытания включали тест на воздействие термоциклирования (300 циклов), предусматривающий резкое изменение температуры тепловой трубы, а также тест на стойкость к хранению при экстремальных температурах.

Пять образцов ТТ были подвергнуты ресурсным испытаниям с целью определения их работоспособности при максимальной рабочей температуре.

На рис. 3 представлена последовательность квалификационных испытаний ТТ серий НР620 и QM, различия в конструкциях которых заключаются только в расположении отверстий для крепежных винтов.

Приемочные испытания, которые проводились для образцов серии FM (летные образцы) и SFM (запас-

ные летные образцы), выполнялись по соответствующей программе, в основе которой лежит сокращенная программа квалификационных испытаний, а также дополнительные испытания ТТ в составе объекта [6—9].

Наиболее трудоемкой задачей является разработка и создание испытательного оборудования. Рассмотрим принципы конструирования некоторых наиболее важных стендов.

Для исследования теплотехнических характеристик ТТ в диапазоне температур  $-50...+50^{\circ}\text{C}$  с возможностью отвода до 200 Вт тепловой энергии и соблюдением теплового баланса на уровне  $\pm 5\%$  были разработаны два стенда.

Первый стенд применялся для испытаний при температурах  $0...+50^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). Подвод тепла к ТТ осуществлялся омическим нагревателем, а охлаждение зоны конденсации ТТ — циркулирующей по замкнутому контуру жидкостью (вода или водно-спиртовой раствор). Температура жидкости поддерживалась на заданном уровне жидкостным термостатом. ТТ размещалась в воздушной среде и покрывалась влаго непроницаемой теплоизоляцией. Испытания проводились при условии постоянства температуры пара. Поддержание  $t_v$  на заданном уровне ( $0, +20, +30, +50^{\circ}\text{C}$ ) при увеличении теплового потока  $Q$  осуществлялось за счет уменьшения температуры охлаждающей жидкости  $t_{\text{охл}}$  в соответствии с соотношениями

$$t_v = t_{\text{охл}} + (R_{\text{охл}} + R_{\text{кон}})Q = \text{const}; \quad (1)$$

$$t_{\text{охл}1} - t_{\text{охл}2} \approx (R_{\text{охл}} + R_{\text{кон}})(Q_2 - Q_1), \quad (2)$$

где  $R_{\text{охл}}$ ,  $R_{\text{кон}}$  — значения термического сопротивления теплопередачи от корпуса ТТ соответственно к охлаждающей жидкости и к пару в зоне конденсации. Индексы 1 и 2 соответствуют двум значениям передаваемой мощности, причем  $Q_2 > Q_1$ .

Второй стенд предназначен для испытаний ТТ при температурах  $-65...-10^{\circ}\text{C}$ . ТТ устанавливалась в вакуумной камере, ее охлаждение осуществлялось жидким азотом через металлическое ребро, соединяющее фланец конденсатора ТТ и сосуд с жидким азотом. Для исследований были выбраны значения  $t_v$ , равные  $-50$  и  $-20^{\circ}\text{C}$ . Для регулировки уровня температуры пара использовался вспомогательный нагреватель с тепловой мощностью  $Q_{\text{нагр}}$ , установленный

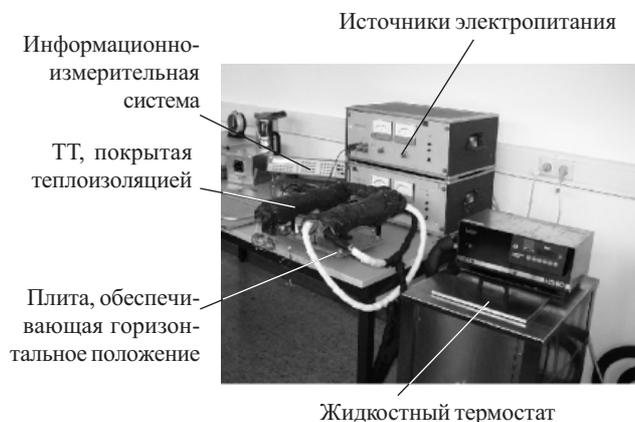


Рис. 4. Стенд для исследования теплотехнических характеристик тепловых труб

по длине соединительного ребра. Для реализации условия

$$t_v = t_{\text{охл}} + (R_{\text{охл I}} + R_{\text{охл II}} + R_{\text{кон}})Q + R_{\text{охл I}}Q_{\text{нагр}} = \text{const} \quad (3)$$

величина  $Q_{\text{нагр}}$  должна изменяться по следующему закону:

$$(Q_{\text{нагр I}} - Q_{\text{нагр II}}) / (Q_2 - Q_1) = (R_{\text{охл I}} + R_{\text{охл II}} + R_{\text{кон}}) / R_{\text{охл I}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{охл I}}$  и  $R_{\text{охл II}}$  — значения термического сопротивления теплопередачи соответственно от вспомогательного нагревателя к охлаждающей жидкости и от корпуса ТТ к вспомогательному нагревателю.

Стенд для испытаний на воздействие термоциклирования включал две ванны с перемешиваемой жидкостью. Температура жидкости в каждой из ванн поддерживалась постоянной и составляла соответственно  $-60$  и  $+80^\circ\text{C}$ . Тепловая труба поочередно погружалась в каждую из ванн. Время пребывания ТТ в ванне ( $\tau = 5$  мин) и время ее перемещения ( $\tau_{\text{п}} = 2$  мин) контролировались реле, а температурные датчики фиксировали температуру исследуемого объекта. Из-за значительного количества циклов (более 300) это испытание считают одним из самых критичных для исследуемых ТТ и трудоемких для персонала.

Стенд для испытаний ТТ на стойкость к хранению предусматривал наличие двух ванн, температура жидкости в которых поддерживалась соответственно на уровнях  $-196$  и  $+100^\circ\text{C}$ . Погружение ТТ в каждую ванну осуществлялось попеременно на 2 ч. Проводилось 5 циклов, в каждом из которых измерялось поле температуры ТТ.

Определение разрывного давления выполнялось по «горячему методу», когда внутреннее давление создается парами теплоносителя, находящегося в ТТ. Средняя температура оболочки ТТ определялась при ее нагреве вплоть до разрыва. Факт разрыва фиксировался акустическим методом. Конструкция стенда гарантировала безопасность персонала при разрыве оболочки и вытекании аммиака из ТТ.

Все виды механических тестов были сведены к испытаниям на воздействие синусоидальных и случайных вибраций. Используемое оборудование позволяло проводить испытания на воздействие вибрации по заданной программе поочередно по трем осям.

Стенд для проведения ресурсных испытаний позволял определять термическое сопротивление ТТ в течение планируемого времени эксплуатации при различных температурах пара в диапазоне  $+30 \dots +80^\circ\text{C}$ . При температуре эксплуатации  $+50 \dots +80^\circ\text{C}$  активизируются химические реакции между материалом корпуса и аммиаком, поэтому ТТ исследовались на температурном уровне  $+50^\circ\text{C}$  в течение полного периода планируемого срока эксплуатации (минимум 2 года). При этом требовалось выполнение условия полноценного функционирования ТТ, т. е. передачи теплового потока величиной 90 Вт при горизонтальной ориентации ТТ, что соответствовало полуторакратному запасу.

Разработанный стенд (рис. 5) предназначен для одновременного испытания восьми ТТ в течение 100 тыс. ч с технологическими перерывами суммарной длительностью не более 20% от периода ресурсных испытаний. Подвод тепла к ТТ осуществлялся омическим

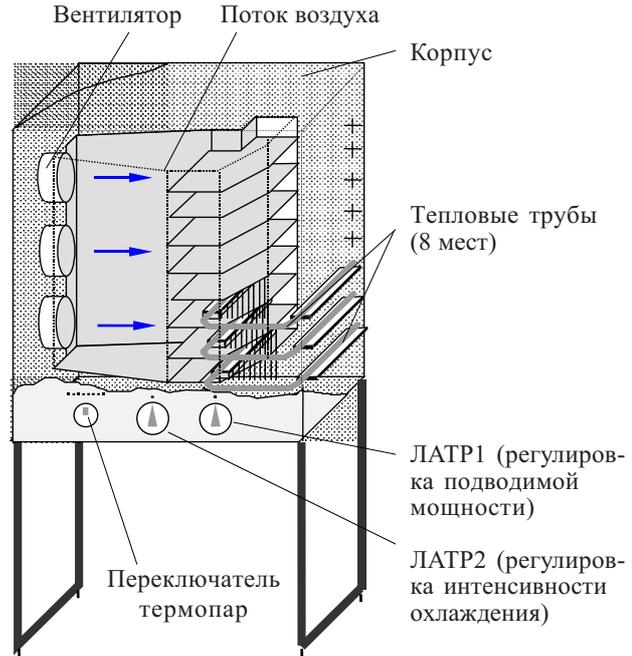


Рис. 5. Стенд для проведения ресурсных испытаний ТТ нагревателем с регулируемой величиной тепловыделения, а отвод тепла — регулируемым потоком воздуха, нагнетаемым вентиляторами из окружающей среды. На каждой ТТ было установлено 8 температурных датчиков, что позволяло определить термическое сопротивление ТТ и коэффициенты теплообмена в зонах теплоподвода и теплоотвода.

Для определения количества неконденсирующегося газа, возникающего в ТТ в результате химической реакции между материалом корпуса и аммиаком или попадающего в ТТ при заполнении ее теплоносителем, измерялось температурное поле в зоне теплоотвода, где через каждые 5 мм были установлены 18 температурных датчиков. Полученное температурное поле позволяет вычислить парциальное давление газа в паровом пространстве ТТ и, в конечном счете, определить массу неконденсирующегося газа. Охлаждение корпуса зоны теплоотвода ТТ осуществлялось потоком газообразного азота, а изменение его расхода позволяло менять уровень температуры пара от  $-65$  до  $-20^\circ\text{C}$ .

Определение течей теплоносителя является особо важным звеном в последовательности квалификационных испытаний ТТ и выполняется после каждого испытания, в котором возможно нарушение герметичности корпуса. Стенд включал климатическую камеру, оборудование которой предусматривало поиск течи аммиака при максимально возможной температуре ( $+80^\circ\text{C}$ ) и соответствующем внутреннем давлении. Для тестов применялись два химических индикатора аммиака — в виде спрея (ADP-219, производитель American Gas & Chemical Co.Ltd., США) и в виде ленты (проявитель «IFH-COLOR 3» на тканевой основе, разработчик Институт физической химии АН Украины). Наличие течи аммиака определялось визуально по изменению цвета проявителя. Минимальная фиксируемая течь составила  $1 \cdot 10^{-7}$  стандартных  $\text{см}^3/\text{с}$  для спрея и  $2 \cdot 10^{-6}$  стандартных  $\text{см}^3/\text{с}$  для ленты.

Созданное стендовое оборудование позволило провести квалификационные испытания. Были получены следующие результаты.

*Теплотехнические характеристики.*

Термическое сопротивление тепловой трубы определялось на основе обработки экспериментальных данных по зависимости

$$R_{\text{ТТ}} = (\bar{T}_{\text{ев}} - \bar{T}_{\text{кон}}) / Q, \quad (5)$$

где  $\bar{T}_{\text{ев}}$ ,  $\bar{T}_{\text{кон}}$  — средние значения температуры корпуса соответственно в зонах теплоподвода и теплоотвода, полученные по показаниям четырех датчиков, расположенных по длине каждой зоны.

Как видно из рис. 6, зависимость термического сопротивления ТТ от температуры пара имеет характер убывающей функции, что обусловлено возрастанием коэффициента теплоотдачи в зоне теплоподвода. Ввиду неравномерности температурного поля по сечению ТТ из-за одностороннего подвода и отвода тепла, в качестве реперного значения для измерения температуры корпуса выбрана точка А, а для измерения  $t_v$  — точка В (см. рис. 6, а). Установка датчиков в данной точке сечения позволяет унифицировать измерения для всех ТТ.

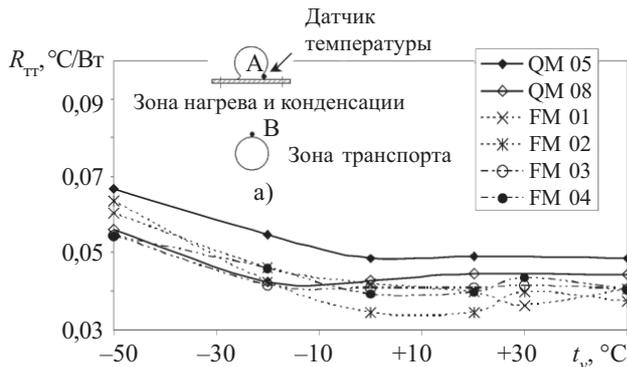


Рис. 6. Зависимость термического сопротивления ТТ от температуры пара при  $Q=90$  Вт и схема расположения термодатчиков (а)

Среднее термическое сопротивление при номинальной передаваемой мощности 90 Вт для труб серий QM и FM (8 образцов) описывается зависимостью

$$R_{\text{ТТ}} = 3 \cdot 10^{-6} t_v^2 - 0,0002 t_v + 0,0426, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}. \quad (6)$$

Термическое сопротивление ТТ как функция передаваемого теплового потока имеет вид возрастающей линейной функции (рис. 7), что обусловлено воз-

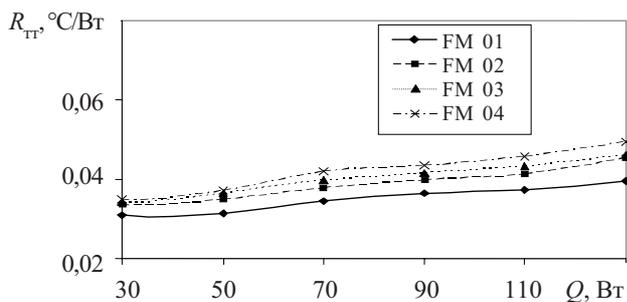


Рис. 7. Зависимость термического сопротивления ТТ от величины передаваемого теплового потока при  $t_v=30^\circ\text{C}$

растанием термического сопротивления в зоне конденсации.

Дополнительной информацией о теплотехнических характеристиках ТТ являются зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи в зонах нагрева и конденсации, полученные в диапазоне плотности теплового потока  $(0,1 \dots 2) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> при температурах пара  $-50 \dots +50^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что отклонение термического сопротивления тепловых труб одной серии не превышает  $0,01^\circ\text{C}/\text{Вт}$  во всем диапазоне рабочих температур и тепловых потоков.

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости максимального передаваемого теплового потока  $Q_{\text{max}}$  от температуры пара. Здесь видно, что для рассмотренных типов ТТ значения  $Q_{\text{max}}$  находятся в диапазоне 90—150 Вт. Для определения величины  $Q_{\text{max}}$  использовались критерии, разработанные в [4].

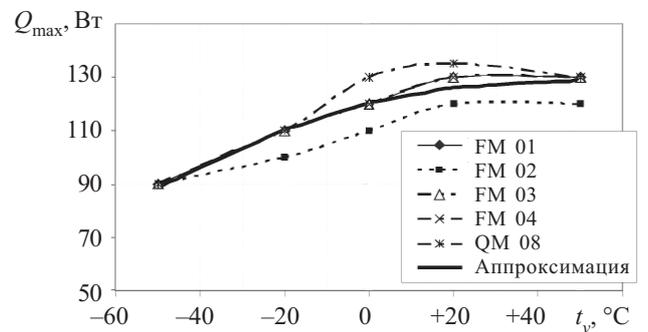


Рис. 8. Зависимость максимального передаваемого теплового потока от температуры пара при горизонтальном положении ТТ

Функция  $Q_{\text{max}} = f(t_v)$  аппроксимируется с погрешностью не более  $\pm 10\%$  уравнением

$$Q_{\text{max}} = -4,465 \cdot 10^{-3} t_v^2 + 0,4 t_v + 120, \text{ Вт}. \quad (7)$$

Отметим, что максимум параметра качества теплоносителя  $N = \sigma r / \nu$  (где  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $r$  — скрытая теплота парообразования,  $\nu$  — кинематическая вязкость теплоносителя), определяющего теплопередающие возможности ТТ, находится для аммиака в диапазоне температур  $-30 \dots -10^\circ\text{C}$ . Из рис. 8 видно, что максимум функции  $Q_{\text{max}} = f(t_v)$  достигается при более высоких температурах пара. Этот факт можно объяснить преобладающим влиянием на величину  $Q_{\text{max}}$  размеров области жидкого теплоносителя в зоне испарения, которая увеличивается в длину с ростом температуры пара. Установленное поведение функции  $Q_{\text{max}} = f(t_v)$  согласуется с результатами исследований других научных коллективов, например [10].

Исследовалось влияние изменения положения зоны теплоподвода относительно зоны теплоотвода по вертикали ( $h$ ) на теплопередающие способности тепловой трубы. ТТ поворачивали так, что продольные образующие фланцев оставались в горизонтальной плоскости. Измерение  $Q_{\text{max}}$  проводилось при разных значениях угла наклона  $\phi$  плоскости изгиба ТТ относительно горизонтальной плоскости. Так как капиллярная структура исследуемых ТТ является весьма чувствительной к ориентации ТТ в пространстве от-

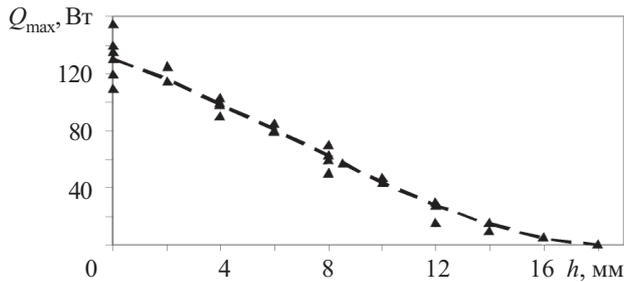


Рис. 9. Влияние положения зоны теплоподвода относительно зоны теплоотвода на теплопередающую способность ТТ при  $t_v = +20^\circ\text{C}$

носительно сил гравитации, точность измерения  $h$  должна быть на уровне  $\pm 0,15$  мм.

Экспериментальные данные, полученные для восьми ТТ при температуре пара  $+20^\circ\text{C}$ , (рис. 9) обобщаются зависимостями:

$$Q_{\max} = 0,022552h^3 - 0,45135h^2 - 6,4184h + 130,5 \quad (8)$$

или

$$Q_{\max} = 1,7575\varphi^3 - 8,221\varphi^2 - 27,473\varphi + 130,5. \quad (9)$$

Здесь  $h$  — в миллиметрах,  $\varphi$  — в градусах.

Тесты на способность ТТ к запуску проводились в температурном диапазоне  $-50...+50^\circ\text{C}$  при минимальной тепловой мощности, равной 5 Вт, и мощности, равной  $0,8Q_{\max}$ , что составляло 50—110 Вт в зависимости от температурного уровня. Все исследованные ТТ (5 макетов) запускались без осложнений.

Тест на способность ТТ восстанавливать теплотехнические характеристики после нарушения функционирования проводился следующим образом. Тепловую трубу при наличии тепловой мощности резко поворачивали на угол  $\varphi = 90^\circ$ . Из-за слива теплоносителя зона теплоподвода перегревалась относительно зоны конденсации. После достижения заданной величины перегрева ТТ возвращали в горизонтальное положение и фиксировали время, требуемое для восстановления исходных характеристик. Все испытанные ТТ восстановили свои исходные характеристики в течение 30, 60 и 110 с при значениях перегрева 10, 15 и  $20^\circ\text{C}$ , соответственно. Детальное описание этого вида испытаний приведено в [9].

В исследованиях [8] по определению количества неконденсирующегося газа, образовавшегося в ТТ, было установлено, что в среднем оно составляет  $1,1 \cdot 10^{-5}$  моль  $\pm 30\%$ . Полученная величина хорошо согласуется с [10], где для ТТ подобного типа приведены значения  $(1...10) \cdot 10^{-5}$  моль.

*Воздействие условий эксплуатации.*

При обработке результатов испытаний, полученных в [8], была определена средняя величина разрывного давления — 180 бар при температуре корпуса 180— $200^\circ\text{C}$ . Разрыв корпуса происходил в различных местах ТТ — как в механически обработанных зонах, так и в необработанных. Это позволило предположить, что место разрыва связано с неравномерностью толщины стенки корпуса, возникающей в процессе экструзии, а также с наличием центров механических напряжений.

После испытаний ТТ на воздействие вибрации их теплопередающие характеристики, термическое сопротивление, герметичность и геометрические размеры не изменились.

Термоциклирование являлось наиболее существенным термомеханическим испытанием на герметичность сварных соединений ТТ и практически не повлияло на их теплопередающие характеристики и термическое сопротивление. Все ТТ прошли тесты в объеме 48 циклов без нарушения герметичности и изменения теплотехнических свойств. При увеличении количества циклов до 200 на одной из ТТ появилась микротечи аммиака (на глухом доннышке корпуса) вследствие развития микротрещин. После доработки технологии герметизации все ТТ выдержали без нарушения герметичности планируемые 300 циклов изменения температуры.

Тест, имитирующий влияние температуры хранения, не выявил нарушений в параметрах ТТ.

Ресурсные испытания пяти тепловых труб, изготовленных по однотипной технологии, проводились при  $t_v = +50^\circ\text{C}$  и  $Q = 90$  Вт для определения их работоспособности в течение 40000 ч. Изменение термического сопротивления, определяемое как отношение текущего значения к начальному, приведено на рис. 10. Наблюдаемые на рисунке отклонения объясняются

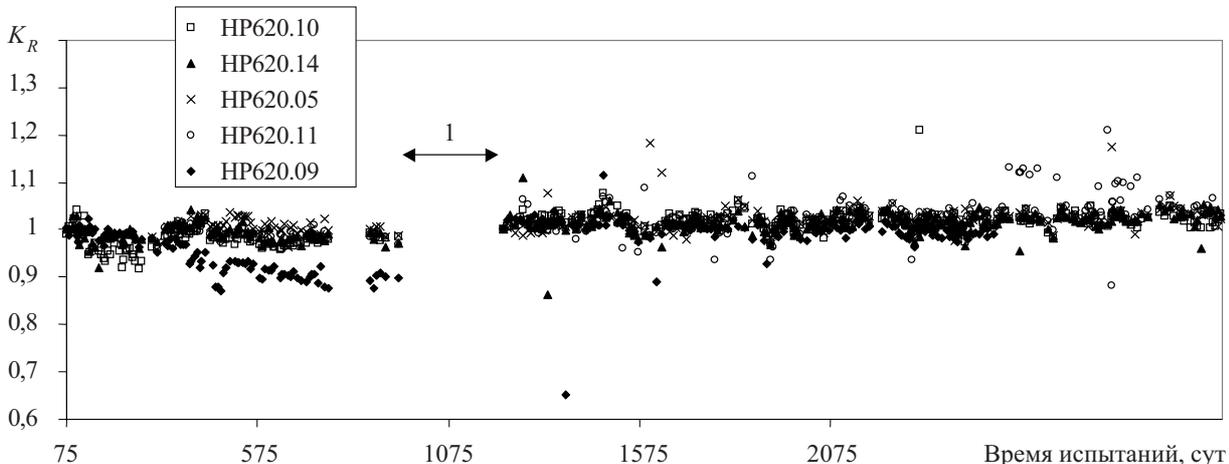


Рис. 10. Относительное изменение термического сопротивления  $K_R$  в течение ресурсных испытаний (1 — остановка стенда для проведения исследований по определению количества неконденсирующегося газа)

погрешностью, возникающей при измерении малых (около 2,5°C) величин перепада температуры в ТТ, и возможными неконтролируемыми изменениями ориентации частей ТТ относительно горизонтальной плоскости.

Начатые в 1998 г. испытания продолжаются и сейчас. Общее время наработки составляет более 3200 суток. Испытуемые тепловые трубы изменили свое термическое сопротивление в пределах погрешности измерений.

\*\*\*

Тепловые трубы, прошедшие испытания в соответствии со стандартом PSS-49, уже на протяжении 5 лет успешно эксплуатируются в составе системы теплового контроля микроспутника на околоземной солнечно-синхронной орбите (высота 568 км) и сохраняют свои теплотехнические характеристики без отклонений величин, полученных при квалификационных испытаниях.

Использование на практике стандарта PSS-49 для квалификационных испытаний характеризуется следующими трудозатратами. Подготовка стендового оборудования (8—10 стендов) для проведения испытаний достаточно трудоемка и требует примерно 48 человеко-месяцев. Трудоемкость проведения самих испытаний по PSS-49 примерно в 2—4 раза выше, чем при испытаниях по применявшимся ранее программам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / Под ред. Г. И. Воронина.— М.: Машиностроение, 1976.

2. Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б., Романкевич А. В. Применение тепловых труб в бортовых энергосистемах летательных аппаратов.— Харьков: ХАИ, 1984.

3. Spacecraft thermal control handbook. Vol. 1.— The Aerospace Press, El Segundo, California; American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Reston, Virginia.— 2002.— P. 489—522.

4. ESA PSS-49 (TST-01). Issue 2. Qualification requirements to heat pipes.— 1983.

5. Brieß K., Bärwald W., Lura F. et al. The BIRD mission is completed for launch with the PSLV-C3 in 2001 // In Digest of 3rd International Symposium of IAA “Small Satellites for Earth Observation”.— Berlin.— 2001.— P. 323—326.

6. Baturkin V., Zhuk S., Olefirenko D., Rudenko A. Thermal qualification tests of longitudinal ammonia heat pipes for using in thermal control systems of small satellites // IV Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”.— Minsk, Belarus.— 2000.— P. 261—269.

7. Батуркин В. М., Олиференко Д. Н., Руденко А. И. Определение количества неконденсирующегося газа в аммиачных алюминиевых тепловых трубах // Промышленная теплотехника.— 2003.— Т. 25, № 5.— С. 28—31.

8. Руденко А. И., Батуркин В. М., Жук С. К., Олиференко Д. Н. Экспериментальное исследование тепловой трубы для космических аппаратов // Промышленная теплотехника.— 2002.— Т. 24, № 6.— С. 51—55.

9. Baturkin V., Olefirenko D. Research on axially grooved heat pipe heat transfer characteristics in ground tests // 31 ICES.— Orlando, Florida.— 2001.— Report N 2001-01-2237.

10. Chritine Hoa, Benoit Demolder, Alain Alexandre. Roadmap for developing heat pipes for ALCATEL space’s satellites // Proceedings of 12th International Heat Pipe Conference.— Moscow, Russia.— 2002.— P. 235—240.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



**Р. Пис. Обнаружение неисправностей в аналоговых схемах.— М.: Техносфера, 2006.— 184 с.**

Эта книга предназначена для инженеров, которые проектируют или обслуживают все виды электронных схем, — как аналоговых, так и цифровых. А также для всех, кто интересуется компьютерами, микропроцессорами, программным обеспечением.

Первая глава — ключ к обнаружению неисправностей в электронных схемах и правильному пониманию проблем. В последующих главах подробно освещены способы обнаружения неисправностей в пассивных и активных компонентах схем, в печатных платах и соединениях. В этой книге подробно описаны конкретные примеры ошибок и способы их предотвращения, перечислены все наиболее опасные ситуации, которые могут возникнуть, а также все возможные отказы и методы их устранения.

НОВЫЕ КНИГИ



**Уразаев В. Г. ТРИЗ в электронике.— М.: Техносфера, 2006.— 352 с.**

В книге «ТРИЗ в электронике» приведены базовые сведения об основных элементах теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), необходимые и достаточные для первоначального ознакомления.

Отличительная особенность этой книги заключается в том, что она основана на собственном практическом опыте автора по использованию инструментария ТРИЗ в области электроники. Как разработать принципиально новую технологию, как установить причины брака в производственном процессе? Ответить на эти вопросы вам поможет эта книга.

Отдельные главы посвящены использованию элементов ТРИЗ в нанотехнологии, в области химических технологий, технологии изготовления печатных плат и влагозащиты электронной техники. Книга предназначена для самого широкого круга читателей. Очевидно, максимальный интерес она представляет для читателей, имеющих отношение к области электроники в широком понимании этого слова, и/или для читателей, склонных к творческому мышлению.