

## **Разработка теплопередающего устройства для альтернативного способа терморегулирования системы обеспечения теплового режима космического аппарата**

**Панин Ю.В.,\* Коржов К.Н.\*\***

*Научно производственное объединение имени С. А. Лавочкина, НПО им. С.А. Лавочкина, ул. Ленинградская, д. 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

*\*e-mail: yuriy.panin@gmail.com*

*\*\* e-mail: kkn@laspace.ru*

### **Аннотация**

Тепловая труба (ТТ) переменной проводимости с газовым регулированием или газорегулируемая ТТ (ГРТТ) предназначена для переноса различной тепловой мощности в условиях внешнего изменения температуры. В настоящей статье представлен сравнительный анализ состояния развития ТТ переменной проводимости на НПО им. С.А. Лавочкина и предложены различные варианты альтернативного применения ГРТТ для системы обеспечения теплового режима космического аппарата.

Представлена методика определения основных конструктивных параметров ГРТТ с аксиальными канавками. Рассмотрен вариант упрощённой инженерной методики расчёта ТТ переменной проводимости, адаптированный для ГРТТ с аксиальными канавками. Представлен опытный образец, и результаты его экспериментальной отработки, подтверждающие возможность использования разработанной упрощённой инженерной методики для проектирования этих устройств.

**Ключевые слова:** тепловая труба, тепловая труба переменной проводимости, газорегулируемая тепловая труба, контурная тепловая труба, система обеспечения теплового режима.

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

### **1.1 Состояние вопроса**

Среди служебных систем космического аппарата (КА) важное место занимает система обеспечения теплового режима (СОТР), совершенствование которой позволяет повысить его массоэнергетическую эффективность. В связи с этим, задача усовершенствования СОТР за счёт увеличения эффективности применяемых в ней тепловых труб (ТТ) становится всё более актуальной.

Сегодня ТТ являются одним из основополагающих звеньев СОТР современных негерметичных КА. В основном ТТ применяются для термостабилизации приборных панелей и сброса излишков тепла по средствам радиаторов в космическое пространство. Однако при проектировании СОТР КА все чаще возникает необходимость применения ТТ способных регулировать величину передаваемого ими теплового потока, т.е. изменять в процессе эксплуатации один из своих основных параметров – величину тепловой проводимости в заданном диапазоне температур. Такие ТТ получили название ТТ переменной проводимости и были впервые применены в 1972 г. на орбитальной астрономической обсерватории (ОАО-С) более известной как "Коперник".

В процессе развития ТТ переменной проводимости было создано множество устройств в различном конструктивном исполнении и использующих разнообразные принципы регулирования. Однако, увеличение точности регулирования часто приводило к неоправданному усложнению конструкции, появлению дополнительных механических устройств, различных элементов с обратной связью. Как следствие, это вело к сложной экспериментальной наземной отработке и уменьшению надежности этих ТТ.

Прорывом, заслуживающим внимания, в области проектирования ТТ стало появление в конце 80-ых гг. контурных тепловых труб (КНТТ), которые по многим параметрам стали превосходить традиционные ТТ. Схема традиционной ТТ прямой проводимости представлена на рис.1.

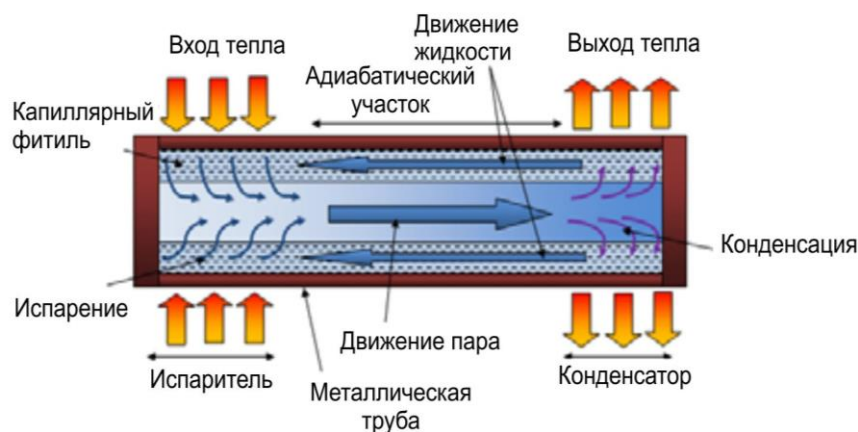


Рис.1. Принципиальная схема ТТ прямой проводимости.

Первый летный эксперимент с отечественными КНТТ был проведен НПО им. С. А. Лавочкина на КА "Гранат" в 1989 г. После успеха в этом эксперименте КНТТ прочно вошли в номенклатуру ТТ, разрабатываемых на предприятии.

КНТТ обладают высоким капиллярным напором, который сочетается с умеренными потерями давления в капиллярной структуре. Это обеспечивается расположением в зоне испарения капиллярной структуры с относительно малым эффективным радиусом – порядка нескольких микрометров. Регулирование в КНТТ осуществляется применением механических регуляторов, электронагревателей или элементов Пельтье. При этом КНТТ имеют значительные конструктивные отличия от традиционных ТТ. Эти отличия позволяют реализовывать более сложные компоновочные решения, и, кроме того, КНТТ обладают диодностью и способностью работать в условиях гравитации. К сожалению, широкие технические возможности этих устройств обеспечиваются достаточно сложной технологией изготовления, которая характеризуется длительной экспериментальной отработкой. В связи с чем, КНТТ имеют высокую стоимость.

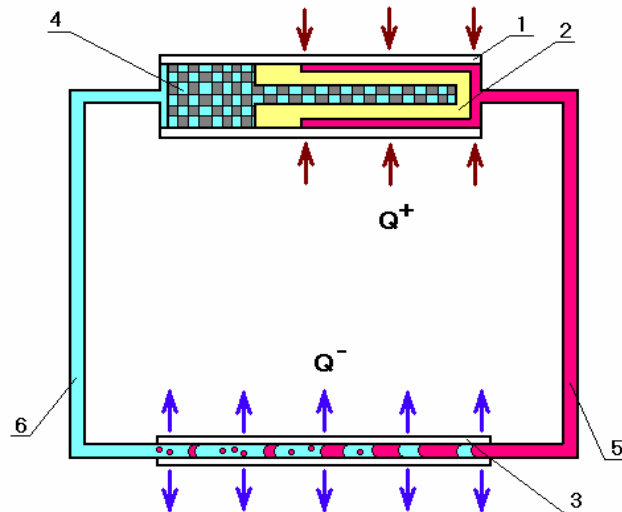


Рис.2. Принципиальная схема КНТТ.

1 - испаритель; 2 - капиллярный насос; 3 - конденсатор; 4 - компенсационная полость; 5 - паровой канал; 6 - жидкостной канал.

Резюмируя сказанное, отметим что актуальной становится задача по созданию ТТ переменной проводимости имеющих более простую, надежную и дешёвую конструкцию по сравнению с КНТТ. К таким ТТ относятся газорегулируемые ТТ (ГРТТ), в которых процессы управления реализуются с использованием особенностей протекающих в них физических процессов без применения каких-либо исполнительных механизмов и дополнительных источников энергии.

## 1.2 Актуальность задачи

Если обратиться к зарубежному опыту, то в качестве примера успешного применения ГРТТ достаточно рассмотреть одну из миссий по ремонту космического телескопа «Хаббл», когда в 2009 г. астронавты шаттла «Атлантис» произвели замену

устаревшей модели широкоугольной камеры на новую. С помощью ГРТТ основание новой камеры (см. рис. 3) поддерживается на уровне минус  $5\pm 2$  °С в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки по настоящее время [2].



Рис.3. Широкоугольная камера космического телескопа "Хаббл".

О масштабах применения ГРТТ на западе можно судить по использованию их в составе Европейского транспортного корабля ATV (Automated Transfer Vehicle), где для охлаждения электронных блоков используется система терморегулирования с применением 40 аммиачных ГРТТ [3].

Опыт проектирования и применения ГРТТ на НПО им.С.А. Лавочкина до недавнего времени практически отсутствовал. Первая попытка внедрить ГРТТ на КА нашего предприятия была предпринята в 2010 г. Предполагалось использовать ГРТТ для СОТР аккумуляторной батареи (АБ) (рис.4) базового модуля служебных систем "Навигатор" изд. "Спектр-УФ". Сегодня "Навигатор" является основной служебной платформой для КА серии "Электро", "Спектр" и "Арктика". Задача состояла в том,

чтобы обеспечить регулируемый теплоотвод в диапазоне температур от 0 до 15 °С полностью пассивными средствами. Для этого необходимо было заменить КНТТ на три ГРТТ с артериальной капиллярной структурой, но недостаточный опыт проектирования таких устройств на предприятии и сжатые сроки, отведенные на работу, не позволили завершить отработку агрегатов и внедрить их в изделие [8].

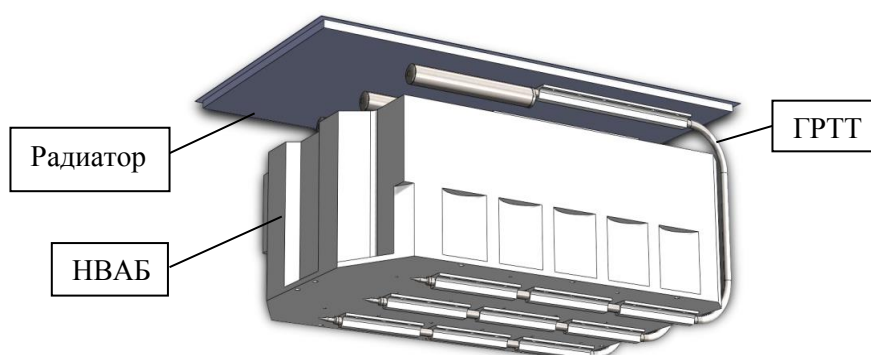


Рис.4. СОТР АБ КА "Спектр-УФ" с артериальными ГРТТ

Тем не менее, работы в этом направлении были продолжены, а в качестве основы для ГРТТ была взята конструкция с аксиальными канавками. ТТ с аксиальными канавками или аксиальные ТТ (АТТ) зарекомендовали себя как простые и эффективные теплопередающие устройства. Они высоко технологичны, так как корпуса для них изготавливаются из алюминия методом горячей экструзии, что позволяет реализовывать внутреннюю капиллярную структуру любой сложности, а также обеспечивать высокую точность контактных поверхностей. За последние 20 лет на нашем предприятии было изготовлено порядка 2500 АТТ различных типоразмеров, которые применялись в составе более чем 20 КА, и работают по настоящее время.

Важно отметить, что конструкция ГРТТ с аксиальными канавками не имеет ограничений связанных с закупориванием артерии ТТ пузырьками пара или неконденсирующегося газа (НГ), т.е. она не подвержена влиянию так называемого эффекта "застекления", который присущ ТТ с артериальной капиллярной структурой [9].

В настоящий момент НПО им.С.А. Лавочкина ведет подготовку к изготовлению тепловых агрегатов для КА "Канопус-В-ИК" ОАО "НИИЭМ", в составе которого предполагается применение ГРТТ с аксиальными канавками различного диаметра. Также перспективным применением для ГРТТ является СОТР десантного модуля КА "ЭкзоМарс", где существует необходимость прерывания сброса тепла от приборных панелей после посадки на Марс, а применение КНТТ для этой цели не оправдано из-за их сложности и дороговизны.

Очевидно, что для полноценного использования ГРТТ в космической техники необходима отработанная методика их проектирования и изготовления. Существует множество публикаций и теоретических выкладок, описывающих различные аспекты работы ГРТТ, которые позволяют вычислить её основные характеристики и смоделировать работу. Однако в масштабах мало серийного производства проведение расчетов характеристик ГРТТ по узконаправленным методикам является чрезвычайно трудоемким процессом и требует высокой квалификации инженерного персонала. В связи с этим, важной задачей является разработка методики проектирования ГРТТ адаптированной к конструкциям с аксиальными канавками различного профиля и



корреляция расчетных значений с результатами наземной экспериментальной отработки.

## **2. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ**

### **2.1 Постановка задачи**

Метод регулирования, применяемый в ГРТТ, является одним из самых простых способов пассивного регулирования ТТ. Он основан на использовании НГ, который как бы укорачивает эффективную длину конденсатора при изменении передаваемой мощности, так как интенсивность теплопереноса через слой НГ мала, особенно при отсутствии естественной конвекции в условиях невесомости. Основным отличием проектирования ГРТТ от проектирования традиционной ТТ является определение объема НГ, необходимого для блокировки конденсатора, и объема резервуара для его хранения. Таким образом, для проектирования ГРТТ подходит методика, предназначенная для определения конструктивных характеристик обычных ТТ за исключением устройства резервуара и особенностей, накладываемых наличием НГ.

В качестве основы для разработки такой методики была взята конкретная задача по проектированию ГРТТ с аксиальными канавками. Данная ГРТТ предназначена для отвода тепловой мощности от целевой аппаратуры КА "Ионозонд", расположенной на двух отдельных приборных панелях и последующего сброса на радиатор. ГРТТ имеет две зоны испарения и, в том числе, используется для перераспределения тепловой

нагрузки между ТСП. Зона конденсации представляет собой участок ТТ, на который с внешней стороны установлен радиатор излучатель (рис.5).

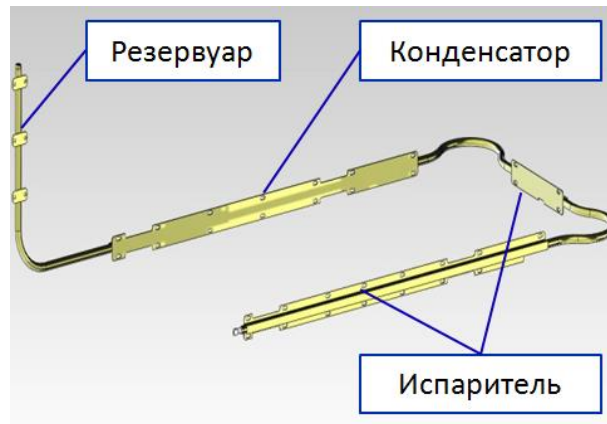


Рис.5. ГРТТ КА "Ионозонд" (радиатор не показан)

## 2.2. Конструктивные особенности

Отличительной чертой многих ГРТТ вне зависимости от типа капиллярной структуры является наличие резервуара для НГ. Существует ограничение точности пассивного регулирования этими ТТ, связанное с соотношением объемов резервуар/конденсатор, таким образом при 10-кратном соотношении объемов резервуар/конденсатор достигается точность поддержания температуры на уровне  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Исходя из теории ГРТТ, достичь точности поддержания температуры на уровне тысячных долей градуса можно при соотношении объемов порядка 2000. Однако чем больше резервуар, тем сложнее решать проблему по его размещению в компоновке КА и устройству в нем капиллярной структуры, необходимой для возврата теплоносителя.

Особенность рассматриваемой ТТ состоит в том, что резервуар для хранения НГ конструктивно является продолжением корпуса трубы, что в свою очередь сказывается на точности регулирования, так как соотношение объемов резервуар/конденсатор всего 0,67, однако дает ряд преимуществ перед более сложными конструкциями с отдельными резервуарами.

Во-первых, такой резервуар не выходит за диаметр трубы, что упрощает его размещение. Во-вторых, нет необходимости располагать дополнительную капиллярную структуру в резервуаре для возврата из него теплоносителя, так как для этих целей хорошо подходят уже имеющиеся по всей длине корпуса аксиальные канавки. И наконец, корпус с аксиальными канавками производится из алюминиевого профиля, получаемого экструзией (горячим прессованием), что позволяет минимизировать затраты на изготовление резервуара и капиллярной структуры.

### **2.3 Определение проектных параметров**

Основой проектирования любой ТТ является определение ее конструктивных параметров, количества передаваемого тепла, рабочего диапазона температур и массы заправки теплоносителем. Обычно эти параметры определяются в ходе инженерного теплового расчёта.

На первом этапе расчета выбирается тип профиля ТТ (рис.6), после чего определяются проектные параметры без учёта газового регулирования при максимальном тепловыделении.

Предварительная оценка профиля ТТ проводится с помощью графика зависимости теплопередающей способности АТТ от температуры. График составлен на основе данных полученных при испытаниях образцов АТТ с теплоносителем аммиак (рис.7) и позволяет в первом приближении определить внутренние геометрические параметры ТТ. Внешние геометрические параметры ТТ обычно определяются на этапе предварительного проектирования СОТР и практически полностью зависят от компоновки КА.

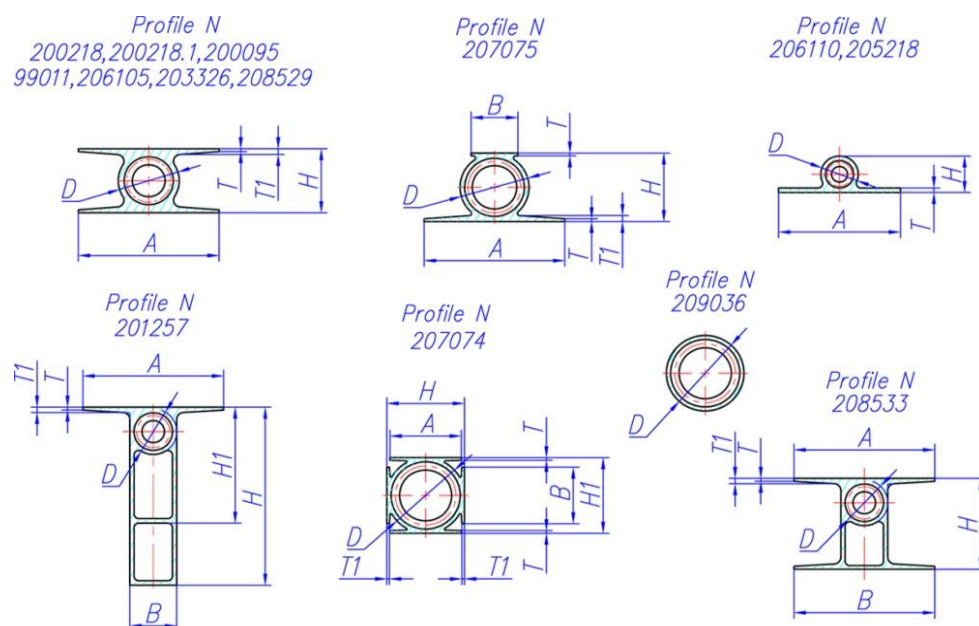


Рис.6. Профили аксиальных ТТ.

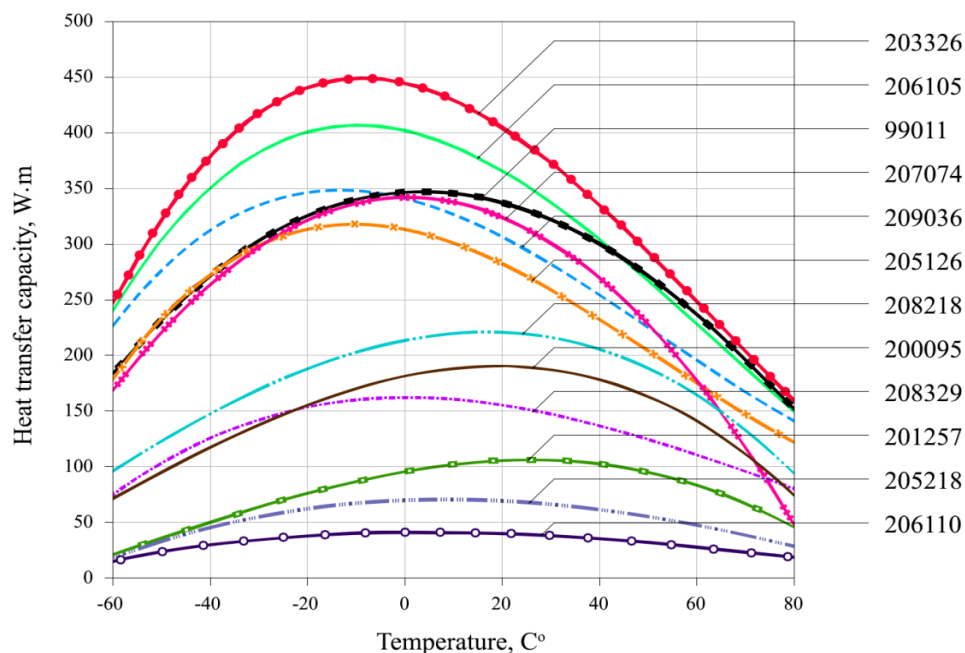


Рис.7. Зависимость теплопередающей способности от температуры.

Более точные параметры ТТ определяются с помощью пакета прикладных программ для расчета характеристик ТТ с аксиальными канавками «GROOVE 1.0», в основу которого положена одномерная модель гидродинамики и тепломассопереноса без учета сил тяжести.

Алгоритм решения сводится к нахождению температуры насыщения  $t_s$  и максимального теплового потока  $Q_{max}$ , удовлетворяющих граничным условиям. В программу в качестве исходных данных вводятся: вид теплоносителя, геометрические параметры профиля, рабочая температура и коэффициенты теплоотдачи в зонах подвода и отвода тепла. В результате расчета определяется максимальная для заданной рабочей температуры мощность ТТ -  $Q_{max}$ , термическое сопротивление в зонах подвода

$R_{исп}$  и отвода тепла  $R_{конд}$  и другие параметры. На рис.9 представлено окно программы с результатами расчёта.

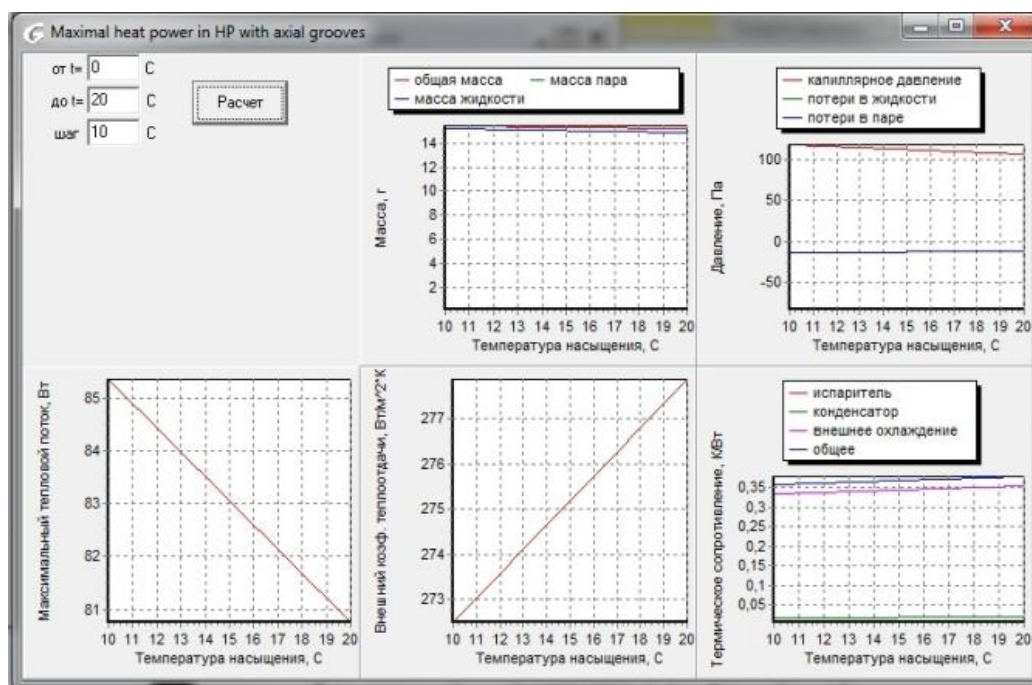


Рис. 8. Исходные данные и результаты расчета выполненные с помощью программы «GROOVE 1.0».

## 2.4 Расчет массы НГ

На втором этапе расчёта определяются масса НГ и объём резервуара для его хранения. Для этого используется простая модель для расчёта ГРТТ, так называемая модель плоского фронта, основанная на допущении о наличии плоской и абсолютно чёткой границы раздела пар-газ, за которой температура резко падает от уровня температуры насыщения в неблокированной части до температуры охлаждающей среды [5,6]. Такая модель недостаточно полно отражает реальную физическую

картину, так как не учитывает теплопроводность корпуса и диффузию пара теплоносителя и газа. Тем не менее, она может быть использована для определения конструктивных характеристик ГРТТ в первом приближении [7]. Принципиальная схема ГРТТ представлена на рис. 9.

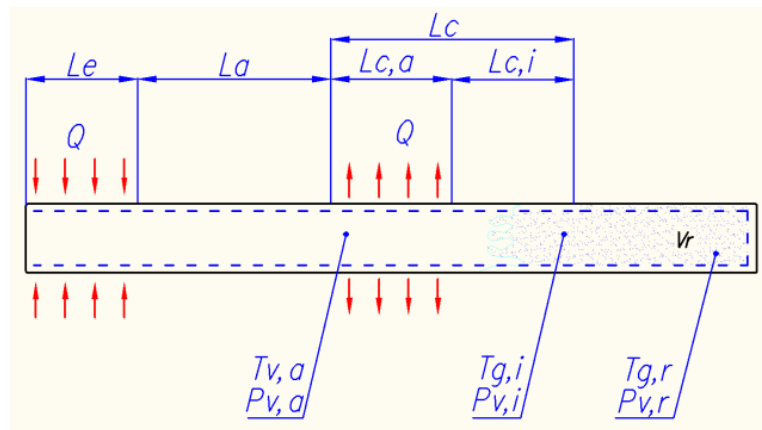


Рис. 9. Принципиальная схема.

Количество тепла, отводимого трубой, определяется по формуле теплопередачи:

$$Q = kF(T_{va} - T_{sc}) \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $F$  – площадь поверхности конденсатора,  $T_{va}$  – температура пара в канале,  $T_{sc}$  – температура стока.

Площадь поверхности конденсатора определяется диаметром ГТ и длиной активного участка:

$$F = 2\pi\left(\frac{d}{2}\right)L_{ca} \quad (2)$$

Учитывая известные соотношения для теплообмена излучением между радиатором и окружающей средой в наиболее простом случае можно записать уравнение (1) в следующем виде:

$$Q = \frac{2\pi d/2 L_{ca} (T_{va} - T_{sc})}{\frac{1}{\alpha_{конв}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\varepsilon \sigma \left( \frac{F_{рад}}{2\pi d/2 L_{ca}} \right) (T_{va}^2 + T_{sc}^2) (T_{va} - T_{sc})}} \quad (3)$$

Предположение, что НГ подчиняется законам идеального газа, позволяет использовать уравнение состояния:

$$P_{нг} V = \left( m_{нг} / M_{нг} \right) R T_{sc} \quad (4)$$

где  $P_{нг}$  – давление НГ,  $V$  – объём, занимаемый НГ,  $m_{нг}$  – масса заправки НГ,  $M_{нг}$  – молярная масса НГ,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T_{sc}$  – температура газа, равная температуре стока.

Масса заправки инертного газа выражается из уравнения (4):

$$m_{нг} = \frac{P_{нг} V M_{нг}}{R T_{sc}} \quad (5)$$

В состоянии равновесия давление НГ  $P_{нг}$  равно давлению пара в активной части конденсатора  $P_{va}$ . Давление насыщенного пара является функцией температуры  $T_{va}$ . Принимая модель «плоского фронта» раздела пар-газ, а также пренебрегая диффузией пара в НГ предполагаем, что объём НГ складывается из объёма резервуара  $V_r$  и части конденсатора, заполненной НГ (неработающей части конденсатора):

$$V = V_r + \pi \left( d/2 \right)^2 (L_c - L_{ca}) \quad (6)$$

Подставив уравнение (6) в уравнение (5) получим:

$$m_{нг} = \frac{P_{va} M_{нг} [V_r + \pi (d/2)^2 (L_c - L_{ca})]}{R T_{sc}} \quad (7)$$

где  $L_c$  – длина конденсатора.



Уравнения (4) и (7) составляют систему нелинейных уравнений. Решив данную систему уравнений методом простых итераций, определяем температуру и длину активной части конденсатора для тепловой нагрузки  $Q$  из заданного интервала для ГРТТ.

При максимальной тепловой нагрузке длина активного участка конденсатора совпадёт с полной длиной. НГ будет находиться только в резервуаре. При этом система уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{2\pi d/2L_{ca}(T_{va}-T_{sc})}{\frac{1}{\alpha_{конв}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\varepsilon\sigma\left(\frac{F_{рад}}{2\pi d/2L_{ca}}\right)(T_{va}^2+T_{sc}^2)(T_{va}-T_{sc})}} \\ m_{нг} = \frac{P_{нг}VM_{нг}}{RT_{sc}} \end{array} \right. \quad (8)$$

Решив первое уравнение системы относительно  $T_{va}$ , и определив для полученной температуры давление насыщенного пара, по второму уравнению найдём массу заправки. Поскольку масса заправки НГ в процессе работы ТТ не изменяется, то полученное значение массы газа может быть использовано и для других температурных нагрузок в заданном интервале.

Для решения полученной системы уравнений была использована функция зависимости давления насыщенного пара от температуры в активной части конденсатора для интервала температур от минус 50°C до +50°C [4].

## 2.5. Результаты расчета

В результате проведенных расчетов были получены основные тепловые параметры

ГРТТ представленные в таблице 1.

*Таблица 1.*

$Q_{\text{раб}}$	$Q_{\text{min}}$	$Q_{\text{max}}$	$T_{\text{min}}$	$T_{\text{max}}$	$m_{\text{НГ}}$
Вт	Вт	Вт	°С	°С	мг
60	5	82	0	20	2,66

Был разработан алгоритм действий необходимых для определения основных конструктивных параметров ГРТТ с аксиальными канавками. Расчёт по определению объёма резервуара и массы НГ был реализован в программе MathCAD, что позволяет использовать его при изменении исходных данных и для различных типов профилей.

### **3 НАЗЕМНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА**

#### **3.1 Экспериментальная установка**

Для подтверждения работоспособности ГРТТ с заданными расчетными параметрами были проведены тепловые испытания в вакуумной камере. Основными параметрами, подтверждаемыми в ходе испытаний, являются передаваемая мощность ГРТТ и температура конденсатора, при которой происходит его полное открытие или закрытие НГ. Также в ходе испытаний должно быть определено положение границы раздела пар-газ при изменении передаваемых мощностей, которое позволит судить о правильности заправки НГ.

В ходе испытаний были воссозданы условия, максимально приближенные к эксплуатационным. К зоне конденсации ГРТТ был прикреплен радиатор. Охлаждение радиатора осуществлялось с помощью азотного экрана.

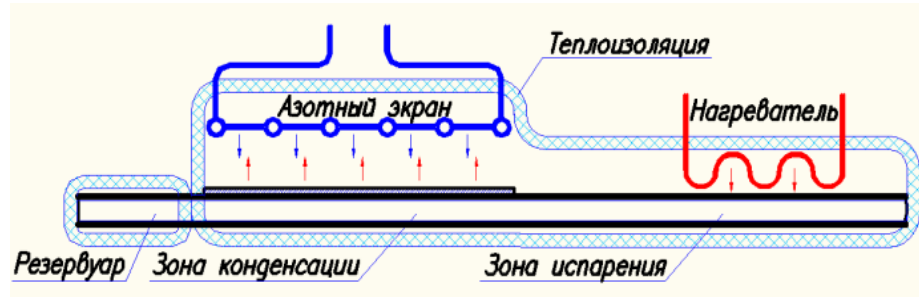


Рис.10. Схема первой испытательной установки.

На радиатор было нанесено термооптическое покрытие с  $\epsilon \approx 0,85$ . Вся ГРТТ с технологическим радиатором была укрыта экранно-вакуумной теплоизоляцией, в соответствии со схемой рис.10.

Температура ГРТТ определялась по показаниям термометров термоэлектрических установленных в соответствии со схемой, представленной на рис.11.

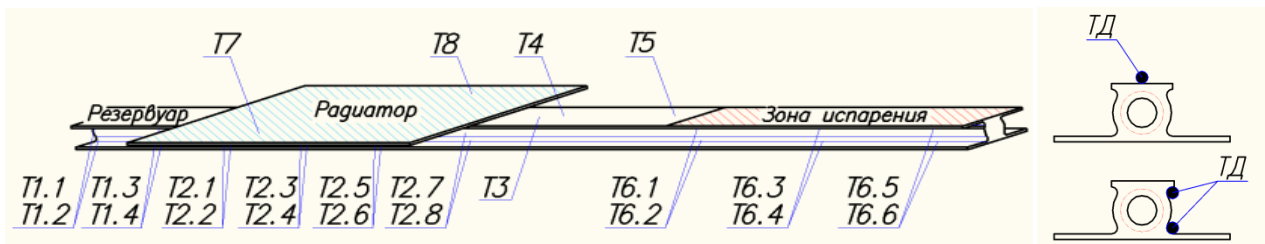


Рис.11. Схема установки термодатчиков.

### 3.2 Результаты испытаний

На испаритель подавалась тепловая мощность равная 5 Вт, после чего температуру азотных экранов понизили до получения температуры на радиаторе минус 60 °С. Таким образом был смоделирован режим работы ГРТТ при минимальной мощности, когда НГ должен закрывать практически весь конденсатор. После чего мощность постепенно увеличивалась с шагом 15 Вт. При этом воображаемая граница при каждом шаге сдвигалась в сторону резервуара, открывая тем самым необходимую площадь конденсатора для сброса большего количества тепла.

В ходе испытаний было получено распределение температур по длине ТТ, показанное на рис.12, из которого видно, что при увеличении мощности до 60 Вт температура испарителя поднялась до 30 °С, что не соответствовало ожиданиям. Объяснением данного несоответствия эксперимента расчету может служить отсутствие в модели учета диффузии, а также влияние теплопритоков на температуру резервуара.

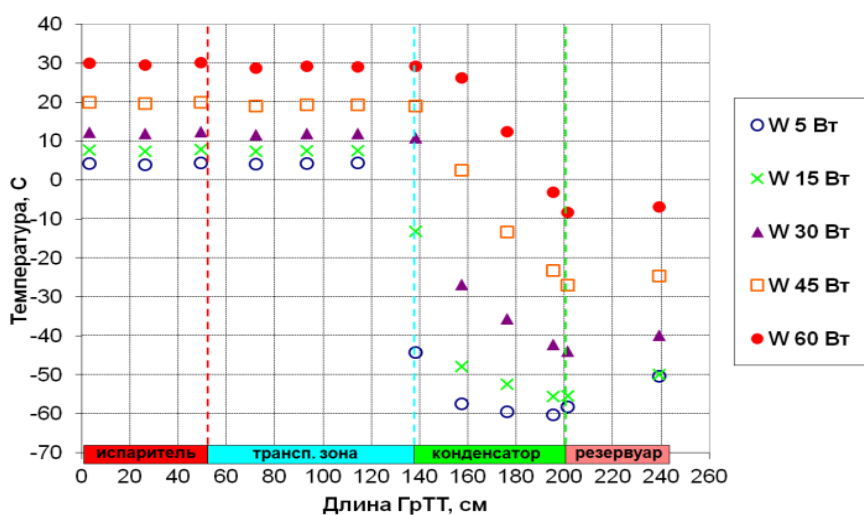


Рис. 12. График распределения температур.

После первого этапа испытаний в расчёт были внесены корректировки связанные с уточнением температуры резервуара учитывающие данные полученные на испытаниях. А также изменена схема расположения теплоизоляции резервуара. Таким образом, на втором этапе испытаний использовался образец с уменьшенной на 20% массой НГ и доработанная экспериментальная установка.

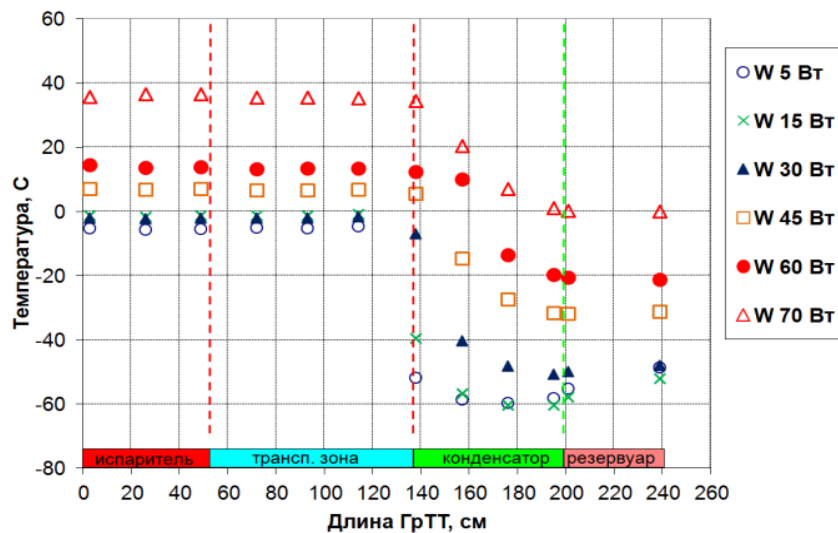


Рис. 13. Распределение температур по длине ГРТТ с уменьшенным на 20% количеством НГ.

Испытания на втором этапе проводились по аналогичной схеме. Это привело к уменьшению температуры испарителя до расчетной (рис.13). Таким образом, при повышении тепловой нагрузки выше расчетного значения до 60 Вт ГРТТ продолжала функционировать, но наблюдались резкие колебания температуры в зоне испарения и конденсации (рис.14), что могло быть вызвано изменением геометрии газового фронта

под действием потока пара или диффузии, а также периодическим частичным пересыханием капиллярной структуры.

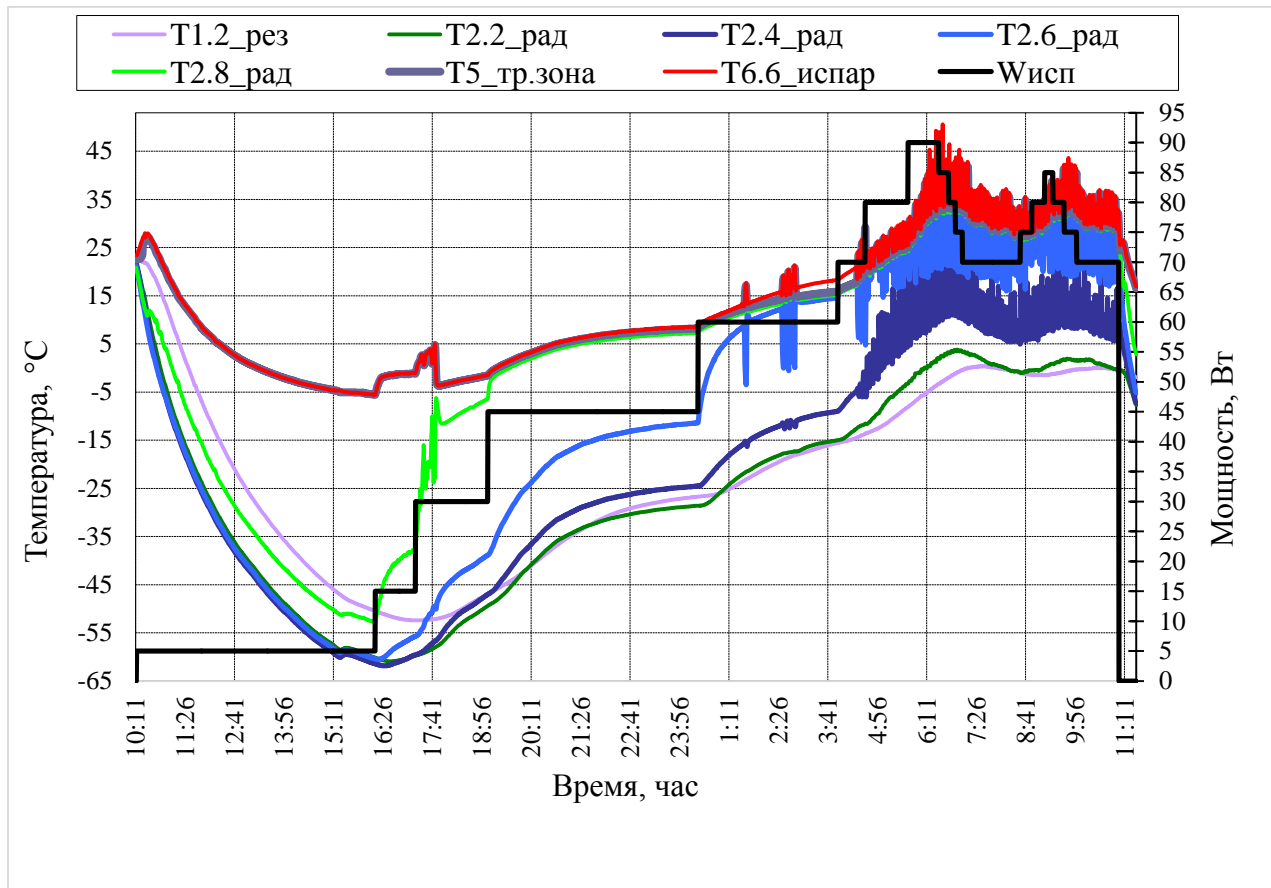


Рис.14. Зависимость изменения температур ГРТТ от мощности по времени.

### 3.3 Анализ эксперимента

Ряд исследователей поставил под сомнение допущение о существовании резкой границы раздела между паром и газом в ТТ, содержащих НГ, объясняя это влиянием диффузионного переноса энергии и массы между паровым объемом и объемом, занятым НГ. Тем не менее использованная в настоящем расчете упрощенная модель

достаточно точно позволила определить параметры ГРТТ в широком диапазоне передаваемых мощностей.

Можно говорить о том, что показания температур на ГРТТ на различных этапах испытания показывают наличие плоского фронта разделения границы пар/газ. Искривление границы проявляется только на мощностях более 60 Вт, где газовый пузырь предположительно вытянулся вдоль резервуара и части конденсатора, прижавшись к верхней более охлажденной стенке ГРТТ. Таким образом, погрешность определения массы НГ по упрощенной модели не превысила 20%. Распределение температур полученных в ходе испытаний позволяет судить о том, что модель плоского фронта начинает противоречить реальной физической картине только на мощности равной 75 % от максимальной.

Также испытания показали, что температура резервуара ГРТТ влияет на точность и диапазон регулирования, в связи с этим очень важной задачей является обеспечение минимальных теплопритоков во время наземной отработки.

#### **4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложены альтернативные теплопередающие устройства с пассивным терморегулированием – ГРТТ на базе капиллярной структуры с аксиальными канавками. Эти устройства способны заменить в ряде автономных СОТР современных негерметичных КА более дорогостоящие и сложные контурные ТТ, так как используют для управления особенности протекающих в них физических процессов без

применения каких-либо исполнительных механизмов и дополнительных источников энергии, что позволит увеличить надежность автономных СОТР и сократить время их изготовления и отработки.

Представлена упрощенная инженерная методика расчета ТТ переменной проводимости, успешно адаптированная для ГРТТ с аксиальными канавками. В ходе экспериментальной отработки определена граница применения простой модели ГРТТ без учета диффузии и с предположением, что фронт раздела пар-газ плоский. Достоверность полученной методики подтверждена на примере разработки простой конструкции ГРТТ с аксиальными канавками и с пассивным резервуаром того же диаметра, что и корпус ГРТТ.

Разработанная ГРТТ обеспечивает точность регулирования температуры  $\pm 10^\circ$  достаточную для применения в служебных системах КА при передаваемых мощностях от 5 до 60 Вт. Такая конструкция имеет потенциал для повышения точности регулирования путем частичного удаления капиллярной структуры резервуара и тем самым увеличением его объема без изменения габаритов ГРТТ.

Использованную упрощенную инженерную методику расчета можно применять для проектирования ГРТТ с малым диаметром профилей капиллярных структур с аксиальными канавками и ограничением передаваемой мощности, при которых диффузия газов мала и модель «плоского фронта» раздела пар-газ остается справедливой.



## Библиографический список

1. Schlitt K.R., Brennan P.J. and Kirkpatrick J.P. "Parametric performance of extruded axial grooved heat pipes from 100 to 300 K", AIAA Paper-724-74, pp.1-9.
2. Gleveland P.E., Buchko M., Stavely R., Pham B. "Thermal Vacuum Test Performance of the Hubble Space Telescope (HST). Wide Field Camera 3", ICES 33, 01 №2459, 2003.
3. Mullender B. "Design and Manufacturing of Heat Pipes on ATV", Proc. of the 13-th. IHPC Shanghai, China, pp. 595-602. Sept. 21-25, 2004.
4. Чи С.В. Тепловые трубы. Теория и практика. М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
5. Marcus B.D., Fleischman G.L. "Steady state and transient performance of not reservoir gas controlled heat pipes", ASME Paper 70-HT/SpT-11.1970.
6. Edwards D. K., Marcus B.D. "Heat and mass transfer in the vicinity of the vapor/gas front in a gas loaded heat pipe", ASME Winter Annual Meeting, Washington, D.C.: 1971. Pub. Trans. ASME, Ser. C, vol. 94, no. 2. 1972.
7. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: Пер. с англ. – Москва: Энергия, 1979. – 181 с.
8. Goncharov K.A., Panin Y.V., Kochetkov A.Y. Application of arterial variable conductive heat pipe for storage battery cooling system, International Conference of Environmental Systems №43, AIAA 2013-3305, USA, Colorado, Vail.
9. Гончаров К.А., Кочетков А.Ю., Панин Ю.В., Антонов В.А., Кайя Т. Анализ циркуляции теплоносителя в артериальной тепловой трубе // Вестник «НПО им. С.А.Лавочкина». 2013. № 2(18). С.20-25.