УДК 536 241

На правах рукописи

*іВшШЛОО*

**Викулов Алексей Геннадьевич**

**КОНТАКТНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЕЕ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В**

**КОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Специальность 01 04 14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

003160388

Москва - 2007

Работа ^выполнена в Московском авиационном институте (государст­венном техническом университете)

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент Меснянкин Сергей Юрьевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор Ненарокомов Алексей Владими­рович

кандидат технических наук, доцент Орлин Сергей Андреевич

Ведущая организация ФГУП «Красная Звезда», г Москва

Защита состоится « » 2007 г на заседании диссертацион­  
ного Совета Д 212 125 08 при Московском авиационном институте (государ­  
ственном техническом универсистете), Волоколамское шоссе, д 4

Отзывы в 2х экземплярах, заверенные печатью, просьба прислать по адресу 128993, г Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д 4, Москов­ский, авиационный институт (государственный технический универсистет) «МАИ»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ

Автореферат разослан « *^y>P7M>fA* 2007 г

Ученый секретарь *,/>*

диссертационного Совета Д 212 125 08 \?

кандидат технических наук, доцент *ґ' j—* Никипорец Э Н

**з**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При разработке современных энергетических установок, особенно космического назначения, приходится решать комплекс задач, направленных на повышение их эффективности и надежности, сниже­ние массовых и габаритных характеристик, обеспечение оптимальных усло­вий работы по всем видам нагрузок' механическим, электрическим, тепло­вым

Как известно, энергетические установки предназначены для получе­ния, преобразования, передачи и хранения различных видов энергии на борту космического летательного аппарата Эти процессы прямо или косвенно свя­заны с теплообменом между определенными термодинамическими фазами, который происходит на границах, характеризующихся разрывом непрерыв­ных полей температуры и теплофизических свойств Как правило, одна из взаимодействующих фаз является твердой, и в зависимости от агрегатного состояния второй задачи теплообмена делятся на теплоотдачу в системе твердое тело - жидкость или твердое тело - газ, контактный теплообмен в системе твердое тело - твердое тело Для теплообмена между веществами в жидком или газообразном состоянии используются теплообменные аппараты (рисунок 1), в которых рабочие тела пространственно разделены, а перенос тепловой энергии от одного теплоносителя к другому осуществляется через твердую теплопередающую стенку, которая имеет несколько слоев основные материалы, защитные покрытия и осадок, появляющийся на поверхностях при длительной работе аппарата.

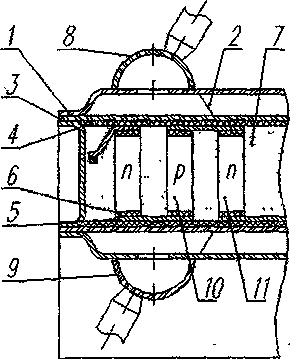


Рисунок 1 - Конструкция термо­электрического преобразователя, совме­щенного с теплообменником (1, 3 - обо­лочки из нержавеющей стали или ниобия, связанные гофрированной проставкой 2,\* 4 - изолятор из окиси бериллия1; 5 - Пла­стинки из молибдена для коммутации термостолбиков, 6 - прослойка, обеспе­чивающая соединение полупроводнико­вых материалов термостолбиков и мо­либденовой пластинки, 5, 7 -теплоизоляция да стекловаты, 8 — коллек­тор холодного теплоносителя, 9 - кол­лектор горячего теплоносителя, 10 - по­лупроводниковый термостолбик р-типа, 11 - полупроводниковый термостолбик п-тшга)

**4**

При получении тепловой энергии в ядерных реакторах (рисунок 2) те­пло передается через находящиеся в контакте с таблетками делящегося веще­ства, твердые оболочки тепловыделяющих элементов, охлаждаемых жидким теплоносителем В случае прямого преобразования энергии, например, в тер­моэлектрических генераторах, (рисунок 1), тепловой поток проходит через многослойную утенку, представляющую собой последовательность специ­ально подобранных материалов. Эти примеры убедительно доказывают, что независимо от природы источника тепловой энергии при разработке энерге­тических установок необходимо решать задачи теплопроводности в соедине­ниях твердых, тел.,

***.9 1 2 J 4 5 6***

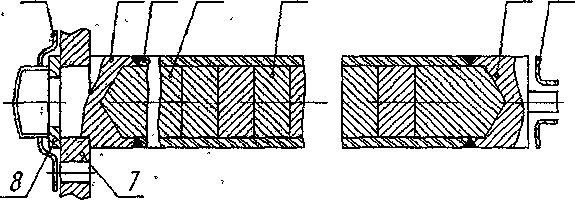


Рисунок 2 - Конструкция ТВЭЛа реактора на быстрых нейтронах (1,5- нако­нечники, 2 - оболочка, 3 - торцовый отражатель, 4 - таблетки делящегося вещества, *6 -* легкая диафрагма реактора, 7 - трубная доска, 8 - фиксирующая пластина, 9 - пла­стина с отверстием для прохода теплоносителя)

Научную проблему, связанную с процессом передачи теплоты через соприкасающиеся тела, принято называть контактным теплообменом Задача теории контактного теплообмена твердых тел заключается в определении взаимосвязи между передаваемым через соединение тепловым потоком или его плотностью и разностью температур на взаимодействующих поверхно­стях Ее решение состоит из нескольких основных этапов.

* установление геометрии системы твердых тел в данных термомеха­нических условиях;
* выяснение влияния геометрии на распределение температуры в пре­делах каждой непрерывной среды,
* вычисление теплофизических свойств в возмущенных слоях материа­лов для данного температурного поля,
* расчет контактного термического сопротивления, определяющего по­тери температурного напора в соприкасающихся телах и равного отношению приведенного перепада температуры на средних контактных плоскостях к плотности теплового потока

5

**\_ 1 АГ**

***R,h,c =* = (1)**

где *CCthc-* термическая проводимость контакта, Вт/м2К, *Rthc-* контактное термическое сопротивление, м2К/Вт, *q-* плотность теплового потока, Вт/м2,

*AT* - контактный перепад температуры, К.

В космических установках, работающих в условиях вакуума, основной тепловой поток в контактах твердых тел переносится теплопроводностью и излучением При температуре теплоотдающего материала менее 1000 К ин­тенсивность излучения относительно мала, и практически весь тепловой по­ток определяется термическим сопротивлением теплопроводности Такая ситуация имеет место, например, в теплопередающих стенках тешюобмен-ных аппаратов и теплоизоляции. Если конструкции данных систем много­слойны, то в соединениях каждой пары материалов тепловой поток распро­страняется через пятна фактического контакта, суммарная площадь которых значительно меньше номинальной. При стягивании к этим пятнам линий те­плового потока в прилегающих к средней контактной плоскости зонах воз­мущения образуется термическое сопротивление стягивания В условиях ва­куума термическое сопротивление стягивания практически определяет полное контактное сопротивление Существующие методы расчета термиче­ского сопротивления стягивания являются либо полуэмпирическими, либо используют фиктивные величины (например, эквивалентную теплопровод­ность), принимая граничное условие 4 рода, допускающее непрерывность температурного поля в близких к идеальным тесных (малодискретных) кон­тактах на фактической площади, и, как следствие, равенство нулю термиче­ского сопротивления контактных пятен

Вместе с тем, экспериментальные исследования термической проводи­мости в контакте металлов (Fe-Cu, Fe-Al, Fe-Ti, Cu-Al) показали, что процесс приближения фактической площади контакта к номинальной, происходящий при увеличении действующей на соединение твердых тел сжимающей силы, сопровождается асимптотическим стремлением к нулю лишь производной по давлению контактного термического сопротивления При этом, сама величи­на контактного сопротивления стремится не к нулю, а к малому конечному значению, представляющему собой термическое сопротивление фактическо­го контакта Отсюда следует, что граница раздела твердых тел в зоне факти­ческого контакта имеет конечную термическую проводимость, т е термиче­ское сопротивление тесного контакта не равно нулю, что противоречит граничному условию 4 рода

В литературе существование собственного термического сопротивле­ния тесного контакта связывается с рассеянием электронов и фононов на гра­нице раздела непрерывных сред Отсутствие других интерпретаций подоб-

**6**

ных результатов объясняется сложностью применения в точках разрыва тем­пературного поля и теплофизических свойств модели непрерывной среды, а также недостаточной изученностью физических механизмов передачи тепло­вой энергии в местах непосредственного контакта поверхностей твердых тел

Таким образом, актуальность работы определена необходимостью тео­ретических и экспериментальных исследований контактной теплопроводно­сти твердых тел, направленных на разработку новых подходов к расчету тер­мического сопротивления соединений высокой и низкой дискретности

Тематика работы соответствует таким пунктам перечня «Приоритет­ных направлений развития науки, технологий и техники», утвержденного Президентом Российской Федерации 21 мая 2006 г, как

* индустрия наносистем и материалов,
* транспортные, авиационные и космические системы;
* энергегика и энергосбережение

**Цель работы** - создание физически обоснованной методики расчета термического сопротивления контактов высокой и низкой дискретности, ра­ботающих в условиях вакуума, экспериментальная проверка теоретических результатов, а также их применение для теплового регулирования в космиче­ских энергетических установках

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие за­дачи:

- оценка современного состояния теории контактного теплообмена по­  
средством сравнительного анализа с более развитой теорией электрического  
контакта,

- рассмотрение термодинамических, теплофизических и физико-  
математических основ теории теплопроводности для установления причин  
трудности ее применения при решении задач контактного теплообмена,

* теоретическое исследование фононной теплопроводности в тесных контактах твердых тел,
* экспериментальное изучение тепловых явлений в тесных контактах,
* построение аналитической модели для расчета термического сопро­тивления стягивания и сопоставление полученных результатов с известными экспериментальными данными,

*•\** разработка методов термического регулирования теплопроводностью для повышения эффективности, надежности и оптимизации работы вновь создаваемых космических энергетических установок

**Научная новизна:**

* впервые теоретически определено термическое сопротивление иде­ального контакта,
* разработан метод расчета сопротивления стягивания, учитывающий дискретность теплопроводящей среды,

**7**

* доказано существенное влияние теплофизических свойств материалов контактной пары на эффект асимметрии теплового потока в контакте металл-полупроводник, , ,
* предложена схема регулирования мощности тегагообменного аппара­та, основанная на использовании, фактора направленности теплового потока

**Практическая ценность и реализация результатов работы:**

* теплофизическая модель идеального контакта, устанавливающая ми­нимальный предел термического сопротивления низкодискретных средине-ний,
* аналитические выражения, упрощающие расчет контактного терми­ческого сопротивления и делающие его более надежным за счет применения разработанной концепции теплопроводности, учитывающей дискретность теплопередающих материалов, а также отказа от использования граничного условия 4 рода и фиктивных величин,
* результаты экспериментального исследования эффекта термической асимметрии в тесном контакте, доказавшие зависимость этого эффекта в вы­сокодискретных соединениях не только от термомеханических, но и от теп­лофизических свойств материалов,
* применение зависимости эффекта асимметрии теплового потока от теплофизических свойств при решении задач теплового регулирования,
* рекомендации по обеспечению оптимальной теплопередачи двух­слойных систем и примеры термоконтролирующих устройств, в которых эф­фективно используются полученные результаты.

**Достоверность результатов работы** обеспечена

* совпадением значений контактного термического сопротивления, рассчитанного по установленным аналитическим выражениям, с известными опытными данными,
* подтверждением экспериментально полученного эффекта асиммет­рии теплового потока в тесном контакте ранее опубликованными материала­ми

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждены и опубликованы в Тезисах докладов XI Туполевских чтений, Ка­зань (2003), Научном семинаре кафедры авиационно-космической теплотех­ники МАИ, Москва (2006), Трудах IV Российской национальной конферен­ции по теплообмену, Москва (2006), Трудах XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов по руководством академика РАН А И Леонтьева, Санкт-Петербург (2007)

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 6 печат­ных работах, в том числе, патенте на полезную модель

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 78 наименований, со­держит 127 страниц, 42 рисунка и 13 таблиц

**8**

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель и задачи, а также положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** произведен аналитический обзор состояния теорети­ческих и экспериментальных исследований тепловых и электрических явле­ний в контактах твердых тел, совместное рассмотрение которых показывает, насколько хорошо изучены вторые по сравнению с первыми Во многом, та­кой разрыв обусловлен возможностями тепловых и электрических приборов, а также уровнем понимания тепловых и электрических свойств вещества Аналогияэтих свойств позволяет использовать общий для обеих теорий тер­модинамический анализ, выявляющий основы и пути развития теорий тепло­вых и электрических явлений на границе двух сред

С точки зрения необратимой термодинамики сопротивление *R* пред­ставляет собой параметр, который определяется отношением разности по­тенциалов *А(рх* физической величины *X* к потоку Ф^ данной величины

***R =***

***фх***

Для электрического сопротивления в числителе записывается разность элек-У трического потенциала или напряжение *U = А<р*, в знаменателе - сила тока

***I-***

**д-=-**

***и\_\_и\_***

где у \_ плотность электрического тока, А/м2, *F* - площадь поперечного се­чения, м2

В случае термического сопротивления потенциалом теплового потока является температура, а разность температур А*Т* в числителе соответствует плотности *q* теплового потока

*\_АТ \_АТ Kth* - — --77^ ' ***ч Q***

где *Q* - тепловой поток, Вт.

При рассмотрении контактных явлений для определения термического и электрического сопротивления используется разность потенциалов на взаимодействующих поверхностях материалов и поток, проходящий через зону контакта. И электрическое, и термическое сопротивления представляют собой переменные величины, зависящие от множества факторов Это приво­дит к нелинейности тепловых и электрических процессов в зоне контакта и

9

невозможности связи потоков и потенциалов через постоянные коэффициен­ты Данная проблема имеет два пути решения

* представление контактного сопротивления в виде функции парамет­ров, которые оказывают влияние на него
* отказ от использования понятия «контактное сопротивление» и уста­новление прямой взаимосвязи между потоком и потенциалом физической величины в виде

*Фх=/(А<рх)* Ко второму методу прибегают, в частности, в диодной теории тесных контак­тов для получения соотношений типа

***J = fP)*** Для так называемых реальных контактов с фактической площадью, сущест­венно меньшей номинальной, применяется в основном первый способ

Теория теплового контакта очень похожа на теорию Хольма, выде­ляющую основные компоненты электрического контактного сопротивления и их влияние на эмиссию и туннелирование электронов через область контакта Контактное термическое сопротивление также делится на составляющие, которые имеют аналоги в электрическом сопротивлении С этого момента в данных теориях начинается различие если в силу очевидной дискретности носителей электрического тока компоненты контактного электрического со­противления анализируются при помощи квантовой механики, то для расчета составляющих контактного термического сопротивления используются ме­тоды непрерывной среды, что приводит к необходимости введения фиктив­ной теплопроводности и эмпирических коэффициентов Как следствие, на сегодняшний день в теории теплопроводности не решены следующие задачи

* проблема идеального контакта, связанная с принятием граничного условия 4 рода, обобщение которого на однородный контакт приводит к ошибочному выводу, что тепловой поток в однородной среде должен распро­страняться без градиента температуры,
* расчет термического сопротивления тесного контакта, которое со­гласно экспериментальным данным имеет конечное значение, что также про­тиворечит граничному условию 4 рода,
* невозможность применения в нестационарных процессах с характер­ным временем, меньшим времени микростягивания, эквивалентных моделей зоны возмущения, основанных на фиктивных параметрах теплопроводности и теплоемкости,
* отсутствие физически обоснованных моделей явлений стягивания те­плового потока в зоне возмущения;
* неопределенность причин выпрямления теплового потока в двухсо-ставных системах твердых тел (теплофизическое ли это явление, имеющее

10

расчетный предел в идеализированной системе, или следствие изменения механических свойств реального контакта твердых тел при изменении темпе­ратуры)

Таким образом, критический анализ литературы позволил установить нерешенные вопросы и показал необходимость дальнейших исследований физических процессов, лежащих в основе контактного теплообмена

**Во второй главе** рассматриваются физико-математические, теплофи-зические и термодинамические основы теории теплопроводности для выяв­ления причин трудности ее применения в соединениях твердых тел

Теория теплопроводности основана на дифференциальном уравнении второго порядка в частных производных, которое позволяет определять не­прерывное пространственно-временное распределение (поле) температуры для заданных граничных условий

К граничным условиям предъявляются следующие требования

* условия не должны противоречить друг другу,
* условий должно быть достаточно,

- решение задачи должно непрерывно зависеть от вводимых условий  
Для решения уравнения теплопроводности используются 3 типа крае­  
вых условий

-1 рода, когда задаются температуры на внешних границах системы,

* 2 рода, когда задается тепловой поток, проходящий через систему;
* 3 рода, когда в виде закона Ньютона задается линейная комбинация температур и теплового потока

Применение граничных условий позволяет получить корректное реше­ние уравнения теплопроводности для непрерывных сред При разрыве поля температуры в соединениях твердых тел его решение становится некоррект­ным, что приводит к необходимости введения термического сопротивления контакта, которое связывает между собой температурные поля во взаимодей­ствующих материалах

Поскольку контактное термическое сопротивление является средством восстановления физико-математической корректности уравнения теплопро­водности в точках разрыва температурного поля и теплофизических свойств, его анализ должен производиться на основе методов, выходящих за рамки теории теплопроводности непрерывной среды Использование же классиче­ской методологии теории теплопроводности в известных выражениях терми­ческого сопротивления контакта приводит к необходимости введения фик­тивной контактной теплопроводности и граничного условия 4 рода, противоречащего экспериментальным данным

**В третьей главе** изучается проблема граничного условия 4 рода и оп­ределяется термическое сопротивление идеального контакта, на основе кото­рого выводится аналитическое выражение термического сопротивления ре­ального контакта при отсутствии среды в зазорах

11

Согласно принятому в существующей литературе граничному условию 4 рода, допускающему непрерывность температурного поля в идеальном со­единении твердых тел «а» и «Ь», температура контактных поверхностей оди­накова и равна (рисунок 3)

***т* =**

*ab w*

**- *Т* +-**

***Л1***

*b\*wA*

**(2)**

венном направлении *xJ , aSJ*, *b8J* странственном направлении *Xі*

где *aTwl, bTwl-* температуры на свободных поверхностях взаимодействую­щих тел, *aAJ, ЬЯ/* - теплопроводности материалов «а» и «Ь» в пространст-

толщины материалов «а» и «Ь» в про-

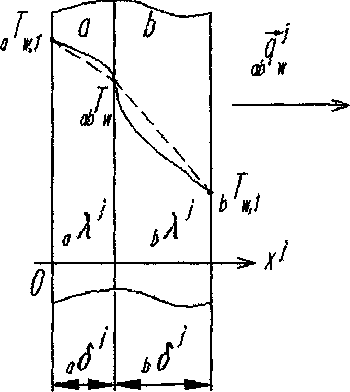


Рисунок 3 - Система двух твердых тел в идеальном контакте (в материале 1 теплопроводность увеличивается с ростом температуры, в материале 2 - уменьшается, пунктиром показано температурное поле при постоянной теплопроводности материалов)

При этом, термическое сопро­тивление идеального контакта равно нулю

Д\*, =^- = 0 (3)

*ab^v*

Поскольку любая физическая среда дискретна, термическое сопротивление идеального кон­такта представляет собой сопро­тивление при передаче тепла от одного молекулярного слоя дру­гому Температуры частиц дан­ных слоев будут равны только в термодинамическом равновесии При наличии теплового потока энергия передается от более воз­бужденных частиц менее возбу­жденным Если бы энергия час­тиц не была связана с температурой, то ее пространст­венное распространение проис­ходило бы в отсутствие темпера­турного градиента А, так как по

**12**

закону Фурье тепловой поток пропорционален градиенту температуры, час­тицы, находящиеся на разных энергетических уровнях, имеют разные темпе­ратуры Отсюда следует, что термическое сопротивление при тепловом взаи­модействии двух молекулярных слоев или термическое сопротивление идеального контакта не равно нулю

По закону Фурье, плотность теплового потока равна произведению те­плопроводности *Л* на градиент температуры-

*idT* І І з *dTq = -A* илию=Л (4)

*dx dx*

*С* учетом дискретности вещества температура изменяется на величину *ST* в каждом молекулярном слое Толщина слоя определится как расстояние меж­ду центрами распределения вероятностей частиц *дх* (центрами тепловых колебаний) Тогда закон Фурье запишется в виде

*ах*

Расстояние между центрами тепловых колебаний частиц можно найти как величину, обратную линейной концентрации частиц данного вещества, кото­рая равна корню кубическому из объемной концентрации

(6)

***м***

*т N,*

***v V V м***

где *NA* - число Авогадро, *М* - молярная масса вещества, *р* - плотность вещества Тогда для линейной концентрации имеем следующее выражение

***сё* =**

**(7)**

Следовательно, среднее расстояние между молекулярными слоями данного вещества будет равно

**<& =**

**С,**

*М*

V

***J***

***г***

***м* і**

*NAP*

**\т**

(8)

Подставляя выражение для *дх* в закон Фурье, найдем *5Т •*

***(***

**і**

*М* 1

Я Я

(9)

Рассмотрение идеального контакта как системы двух молекулярных слоев «а» и «Ь», перепад температуры в каждом из которых равен соответст-

**13**

венно *5 J1* и *8£*, приводит к тому, что разность температур этих слоев определится следующим образом-

*SJT-^Sf + ^Sr^SJ'+Sjr).* (10)

Тогда термическое сопротивление идеального контакта найдется как отно­шение контактного перепада температур к плотности теплового потока

*SJ+Sf*

***R* -1**

***ч***

V

*ab^th.i* — *\**

***J***

***м***

***~\\ (мЛ***

(П)

*2ЫАг*

**V *а***

*Р )*

***\ъР )***

где значения теплопроводности и плотности необходимо брать по средней контактной температуре *abTw*

С учетом термического сопротивления *Rth*, плотность теплового по­тока через идеальный контакт будет равна *Т - Т*

***аЬ 4w***

(12)

*Л*

*-+abRth,t* +■

Для однородного идеального контакта, т.е. контакта твердых тел, представ­ляющих собой один и тот же материал, термическое сопротивление пред­ставляет собой сопротивление при передаче тепла от одного молекулярного слоя к другому.

\

***м***

1

**/**

(із)

*Rth,, =*

*1ST* 1

***№.***

*2q ~ Я*

***A J***

Термическое сопротивление идеального контакта очень мало Например, для контактной пары Cu-Ti расчет показывает следующие результаты

1 *CuTw* j = 600 К, *TlTw* і = 400 К- положительный тепловой поток

оЛ »591,4 К,

*CuTl RAj* = 0,8265 -Ю-11 м2-К/Вт,

**14**

*силЯ\** =3,136-106 Вт/м2

*2 CuTw* j = 400 К, *TlTv* і = 600 К- отрицательный (обратный) тепло­вой поток

*Си,т,Т„=Ш,2к,*

*си,ъ Rth,,* = 0,8225 -Ю"" м2 К/Вт, *с»9\** =-3,151-106 Вт/м2

Таким образом, влияние термического сопротивления идеального кон­такта на плотность теплового потока незначительно Однако, при решении сверхточных задач в области микроскопических систем и малых тепловых потоков приведенная методика позволяет получить реальные значения, не ограничиваясь классическим приближением, согласно которому термическое сопротивление идеального контакта отсутствует

Идеальные соединения практически недостижимы, однако можно по­лучить так называемые тесные контакты, фактическая площадь которых близка к номинальной. Это означает, что практически по всей площади тес­ного контакта между частицами взаимодействующих тей достигаются рас­стояния, сравнимые с размерами атомов Тесные контакты широко исполь­зуются в виде pn-переходов и диодов Шоттки Поскольку они близки к идеальным, разрыв температурного поля в них очень мал, и для их теплового расчета можно использовать методику расчета идеальных контактов Тогда термическое сопротивление тесного (фактического) контакта можно опреде­лить по формуле (11)

Важным моментом является то, что сопротивление тесного контакта не зависит от контактной площади, а определяется исключительно теплофизи-ческими и термодинамическими свойствами материалов. От площади зависит другая составляющая контактного сопротивления - так называемое сопро­тивление стягивания, которое возникает в материале при стягивании линий теплового потока к местам фактического контакта и имеет довольно значи­тельную величину Сопротивление стягивания проявляется только в реаль­ных контактах

Термическое сопротивление соединений высокой дискретности, рабо­тающих в условиях вакуума, характерных, в том числе, и для космических установок, определяется суммой сопротивлений стягивания и пятен фактиче­ского контакта (рисунок 4)

*ab^th,c~a^th,ai+abRth,r+b"th,cn* =

/ V (14)

15

где *abRthr-* термическое сопротивление тесных контактов на фактической площади, *a^-thcn' b^ihcn~* сопротивления стягивания в материалах «а» и «Ь», *аЬ Rth сп* - полное термическое сопротивление стягивания в материалах

той или иной методики для расчета эффекта стягивания устанавливается по предельным значениям контактного термического сопротивления1

1 при номинальных контактных давлениях больше 90. .100 МПа, ко­гда фактическая контактная площадь примерно равна номинальной, контакт­ное термическое сопротивление стремится к малой конечной величине, пред­ставляющей собой сопротивление тесного контакта, а термическое сопротивление стягивания равно нулю

«а» и «Ь».

**Л**

***)Ri***

**а л**

***со***

*bRtkm*

*\Rth,*

Рисунок 4 - Термическое сопро­тивление в зоне возмущения

Поскольку термическое со­противление тесного контакта (~ КГ11 м2К/Вт) на несколько по­рядков меньше сопротивления стя­гивания (~ 10 4 м2 К/Вт), именно эф­фект стягивания определяет контактную термическую проводи­мость при отсутствии среды в зазо­рах

Достоверность результатов

*hmRlhiC=RtKr> hmRth.„* = 0

4.-4, *'"'" ""* 4=4 *'"'"'* ^

2 при отсутствии контакта, когда фактическая контактная площадь равна нулю, фононная теплопроводность в соединении отсутствует, и терми­ческое сопротивление контакта стремится к бесконечности

(16)

*UmRth с* = оо, *limRthсп* = оо.

4=о *ш-с* 4=о

Чтобы найти *Rlh сп* при *Аг < Ап* необходимо умножить термическое сопротивление тесного контакта на некоторую функцию Ф, аргументом ко­торой является отношение фактической и номинальной площадей *Аг I Ап.*

*А,*

(17)

*R,h,c = Rth,rx®*

*К\*\* J*

Из требований (15), (16) следует, что Ф должна удовлетворять следующим условиям

16

**"Г**

Km Ф = 1,

•4=4,

ІітФ

(18)

Анализ известных математических функций показывает, что для указанных условий вполне подходит функция

O = l + 107ctg(-4J (19)

Коэффициент 107 представляет собой нормирующий множитель, обеспечи­вающий необходимый порядок *Rthcn* Тогда термическое сопротивление в контакте материалов «а» и «о» будет равно

*аЬ* °/А,с *~аЬ ^th.r*

l + 107ctg

V2 *А„ j*

*~ab°th,r +*

1 1

1 *2*

*аР*

**1**

107ctg

*2 А*

и У

**+**

**(20)**

*ґяАг^*

1 1

1 *2*

*2NJ ъл*

**24**

А//Л3 *ь—* 107ctg

***ьР)***

***■nj***

*~ab \*A,r +a^th,at +b^lh,cn~ab&th,r +ab^th,cn •*

Поскольку эффект стягивания происходит в зонах возмущения, средние тем­пературы которых близки к средней температуре контакта *abTw ,* теплопро­водности материалов в первом приближении берутся именно по этой темпе­ратуре и имеют смысл теплопроводностеи зон возмущения

*a^-a^{abTw)> b^=b^\abTw)- '* (21)

При перестановке температур на внешних границах *abTv* меняет свое значе­ние, и, следовательно, изменяются теплопроводности зон возмущения, по­этому по (20) изменяется и термическое сопротивление стягивания (рисунок 5). Иными словами, наблюдается эффект асимметрии теплового потока или термическое выпрямление Степень выпрямления зависит от взаимного ха­рактера и интенсивности изменения теплопроводностеи соприкасающихся материалов (например, для контактной пары Cu-Ti выпрямление теплового потока не превышает 5%) В соединениях с высокой дискретностью сущест-

17

венно проявляется и зависимость термомеханических свойств от температу­ры из-за различия коэффициентов линейного расширения материалов фак­тическая контактная площадь будет изменяться при инверсии теплового по­тока, что отразится на соотношении его величин в прямом и обратном направлении

**10" 8 10"**

**й 6 10"**

**tT4 10"**

**2 10\***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **1 1** | **1 1 1 1 1** | **г ■ —■ і ■ ■ 1** |
| **-** | ^^TtCu | **-** |
| **1** | **1 1 1 1 1** | **і' ' ' і і** |

**06**

**01**

*02*

03

0.8

***09***

**05**

07

10

04

Рисунок 5 - Термическое сопротивление контактной пары Cu-Ti при инверсии теплового потока (средняя контактная температура равна при теплопередаче со сто­роны Си 683,1 К; при теплопередаче со стороны Ті 316,6 К)

Отношение контактных площадей равно обратному отношению соот­ветствующих давлений, поэтому их использование в (20) в качестве аргумен­та равноправно

**А**

**(22)**

*Рг Ап*

Поскольку функция Ф определена только по предельным значениям, необходима ее экспериментальная проверка в нескольких промежуточных точках

Как видно из рисунка 6, формула (20) обеспечивает хорошее количест­венное совпадение с результатами эксперимента Некоторое расхождение между теоретическими и опытными данными обусловлено использованием численной аппроксимации теплопроводностей и плотностей материалов кон­тактных пар, а также большим разбросом в справочных значениях микро­твердости

18

• Экспериментальные данные ■ Расчетные данные

0,5 0,6 0,7

0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 В)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **•** | ' Экспериментальные данные —Расчетные данные | | | | | |
|  | **J** |  |  |  |  |  |
| о,/ п | ***І*** |  |  |  |  |  |
|  | ***\*** |  |  |  |  |  |
| **^- 0,4 ^ о** | **—L** |  |  |  |  |  |
| **^4¾** |  |  |  |  |  |
|  | **ZT5** | **<ж** |  |  |  |  |
| **СК и'^ "** | **HU** | **^** | **Г** | **^** |  |  |
| **0.0 -** | **-Р** |  | **=4Ы** | **Р** |

0,3 0,4

0,0 0,1 0,2

а)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | • Экспериментальные данные ■ Расчетные данные | | | | | | |
| **ь** | **і** |  |  |  |  |  |  |
| **5,о.** | ***А*** | |  |  |  |  |  |
|  | ***\*** |  |  |  |  |  |
| **с? °'5 " 0.0 ■** | ***z\*** |  | ***ы*** | **^** | Ьа | **NN** | **•** |

3,0

41

***в2,5***

2 2,0 "г

»- 1,5 о

**1- 1,0**

***І***

0,5

0,0

0,00 0,05 0,10 0,15 0,20 0,25 0,30 0,35 *PJP,*

**б)**

Рисунок 6 - Экспериментальные и расчетные значения контактного термиче­ского сопротивления а - для контактной пары Си-А1 при средней контактной тем­пературе 333 К (пластический контакт) , б — для контактной пары Fe-Cu при средней контактной температуре 310 К (пластиче­ский контакт), в - для контактной пары Fe-Al при средней контактной температу­ре 348 К (пластический контакт)

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментального иссле­дования теплового потока в тесном контакте Для того, чтобы изучить зави­симость термического выпрямления от термомеханических свойств, необхо­димо сначала установить, насколько сильно и как проявляется зависимость этого эффекта от теплофизических характеристик Идеальным средством для решения этой задачи являются тесные контакты,\* в которых термомеханиче­ские явления практически отсутствуют Для опытного изучения выпрямления теплового потока в таких контактах был проведен эксперимент, в котором использовалась контактная пара из металла - алюминий (А1) - и полупровод­ника - монокристаллический кремний (Si) п-типа

. Полученные опытные данные показаны на рисунке 7 Их воспроизво­димость в рамкйх установленной погрешности ( *6q =* 0,25 при доверительной вероятности 0,95) подтверждена повторным проведением эксперимента

19

Д Анод (AI) - обратный поток а Анод (AI) - прямой поток

**!**

100

80

60

40

20

-20

-40

**-60**

А Катод (Si) - обратный поток ■ Катод (Si) - прямой поток

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  | ***1-^уЄ^'*** | |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  | ***&*** |  |  | ***3f ш*** | **5°** |  |  |  |
| **30 0,** | го о, | **ю 0,** |  | ***І°ьІ*** | '^■•fe | ***та* 1,** | **to 1,** | **50 1,** | **50 \* 2,** | **)0** |
|  |  |  | **■** | **1 *тЯГ*** | **в°** |  |  |  |  |  |
|  | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Средняя плотность теплового потока через контакт q 10"6, Вт/м2

Рисунок 7 - Связь плотности теплового потока с температурами катода (Si) и анода (А1) при прямом и обратном тепловых потоках *(Ьд -* 0,25 при доверительной вероятности 0,95)

Одному и тому же значению плотности теплового потока соответству­ют различные температуры на внешних границах системы Al-Si, и при рав­ных граничных условиях 1 рода плотности прямого (нагрев на катоде) и об­ратного (нагрев на аноде) теплового потока существенно отличаются друг от друга Поскольку площадь тесного контакта близка к номинальной, отноше­ние плотностей тепловых потоков в прямом *qt* и обратном *qr* направлении

будет примерно равно отношению тепловых потоков <2/ *п Qr,* определяю­щему характеристическую функцию *f\K)*

**/ = #-\*- (23)**

*Qr Чг*

Вычисление значения/при температурах на внешних границах 20 °С и 30 °С дает следующие результаты

* в случае прямого теплового потока (нагрев на катоде) *te* = 30 °С, *ta =* 20 °С, *q,=* 1,6 106 Вт/м2;
* в случае обратного теплового потока (нагрев на аноде) 4 = 20 °С, *ta* = 30 °С, *qr* =1,2 106 Вт/м2

Отсюда для принятых граничных температур характеристическая функция равна

**20**

**/-4-і**

1,33,

т.е выпрямление теплового потока в тесном контакте Al-Si превышает 30%, что выходит за пределы погрешности эксперимента

Полученный порядок выпрямления теплового потока в тесном контак­те Al-Si вполне подтверждается данными других экспериментальных иссле­дований, согласно которым для тесных контактов некоторых металлов и

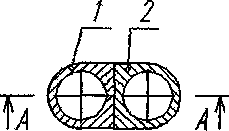
сплавов отношение прямого теплового потока *Qt* к обратному *Qr* может

изменяться от 1,02 до 1,4, и распространяет этот вывод на соединения ме­талл-полупроводник.

Таким образом, выпрямление теплового потока в тесных контактах ме­талл-металл и металл-полупроводник можно считать экспериментально под­твержденным, а его теоретическое обоснование в близких к идеальным кон­тактах высокого качества связать с изменением теплофизических свойств материалов в зависимости от температуры при перестановке условий 1 рода на внешних границах системы

**В пятой главе** предлагается возможность использования свойств тес­ных контактов для теплового регулирования в энергетических установках космических летательных аппаратов. Основное преимущество тесных кон­тактов перед соединениями высокой дискретности - это близость фактиче­ской площади к номинальной и, как следствие, сохранение со временем их свойств в условиях циклических механических и тепловых нагрузок Произ­водство тесных контактов достаточно технологично и позволяет, например, при помощи диффузионной сварки или напыления получать надежные со­единения высокого качества Эти преимущества дают возможность приме­нять свойства тесных контактов в теплообменных аппаратах космических энергетических установок, где требования надежности и сохранения задан­ных параметров системы имеют первоочередное значение

Помимо надежности и стабильности конструкции к энергетическим установкам КЛА предъявляются требования компактности и минимальной массы. В этих условиях большое значение имеет возможность применения одного и того же устройства для решения разных задач.

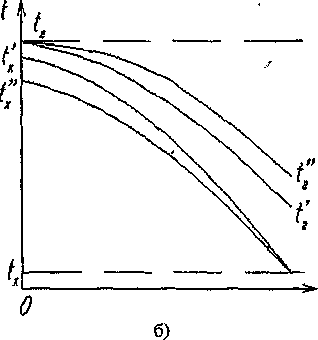
***А-А***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Г** |  | **: 1** | | **,** |
|  |  | **; J** | |  |
|  | |  | | **^:** |
|  | |  | |  |
|  | |  | |  |
| **L** |  |  |  | **-** |

Рисунок 8 - Схема конструкции теплообменника с возможностью регулирова­ния тепловой мощности за счет выпрямления теплового потока в тесном контакте

**21**

Высокая степень термического выпрямления в тесных контактах опре­деленных материалов позволяет использовать в теплообменных аппаратах направление теплового потока как средство регулирования их тепловой мощности На рисунке 8 показана принципиальная конструкция такого теп­лообменника Тепловой поток от теплоносителя с более высокой температу­рой к теплоносителю с менее высокой температурой передается теплопро­водностью через тесный контакт материалов 1 и 2 Если «горячий» теплоноситель подается в канал секции 1, плотность теплового потока имеет одну величину, а если «горячий» теплоноситель подается в секцию 2, - дру­гую. Изменение температур теплоносителей в рассматриваемом теплообмен­нике в случае прямотока и противотока показано на рисунке 9

***t***

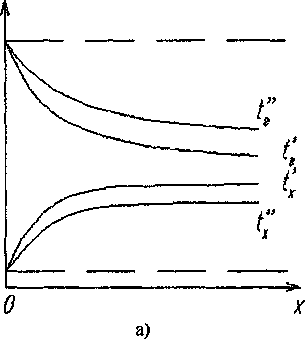


Рисунок 9 - Изменение температуры теплоносителей при тепловом вании а — прямоток, б - противоток

регулиро-

Тепловая мощность аппарата © зависит от расходов рабочих тел и изменения их энтальпий в результате теплообмена в каналах

e,=GA-V) = <?,(V-\*,). . (24)

где *Ge> Gx* — массовые расходы «горячего» и «холодного» теплоносителей,

кг/с, *Ъг* , *Ьг*' - удельные энтальпии горячего теплоносителя на входе и выхо­де из теплообменника, Дж/кг, *hx, hx'* - удельные энтальпии холодного теп­лоносителя на входе и выходе из теплообменника, Дж/кг Изменение удель­ной энтальпии определяется произведением изобарной теплоемкости *ср* на

изменение температуры *At*

**22**

*Ah = cpAt,-* (25)

поэтому тепловая мощность зависит от температур теплоносителей на входе и выходе из аппарата и их средних теплоємкостей

©/ = *G,eZ(t, -\*,') = GxcZ{tx-tx).* (26)

При взаимной замене каналов теплоносителей происходит перестановка входных температур, которой сопутствует изменение плотности теплового потока через тесный контакт материалов 1 и 2, что приводит к изменению

температуры горячего теплоносителя на выходе из аппарата с *t\** на *ts"* и

изменению выходной температуры холодного теплоносителя с *tx* на *tx"*

(рисунок 9) В результате, тепловая мощность теплообменника станет равной значению

®, = *G,7Z(tt -ts")=G^(tx"-tx),* (27)

отличному от 0/ Отношение тепловых мощностей теплообменного аппара­та при его работе на прямом и обратном режимах должно быть пропорцио­нально характеристической функции, определяемой отношением тепловых потоков через тесный контакт материалов 1 и 2 в прямом и обратном направ­лении

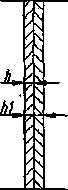
©/ *, Q, й,*

®r *Qr Чг*

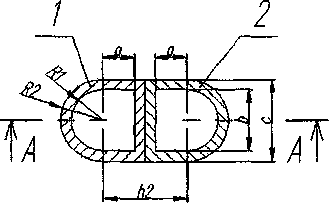
Таким образом, применение в тешюобменных аппаратах космических энергетических установок тесных контактов с большой степенью выпрямле­ния теплового потока позволяет удовлетворить, с одной стороны, требовани­ям надежности конструкций и стабильности их свойств, и, с другой стороны, требованиям компактности и минимальной массы путем обеспечения воз­можности использования одной и той же системы для различных целей На­пример, рассмотренный теплообменный аппарат может применяться для по­догрева воды и получения перегретого пара при тех же самых входных параметрах теплоносителей

Для того, чтобы оценить влияние свойств материалов контактной пары на изменение тепловой мощности аппарата за счет выпрямления теплового потока в передающей стенке, необходимо выбрать для расчета такую систе­му, которая исключила бы возможность воздействия геометрии на исследуе­мый эффект. В схеме «труба в трубе» при взаимной замене каналов изменя­ются площади теплоотдающих поверхностей, поэтому рационально выбрать Простейшую схему теплообменника с плоской стенкой (рисунок 10) Направ­ление движения теплоносителей - прямоток (рисунок 9а)

**23**



***A-A***



**л\_**

Рисунок 10 - Схема конструкции теплообменника с тепловым регулированием в плоской стенке

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Таблица 1 - Характеристики теплообменного аппарата | | |
| Параметр | Единица вели­чины | Значение |
| Размера | м | 0,012 |
| Размер *Ъ* | м | 0,024 |
| Размер *с* | м | 0,032 |
| Размер *h* | м | 0,004 |
| Размер *hi* | м | 0,008 |
| Размер *h2* | м | 0,032 |
| Размер *h3* | м | 0,064 |
| Размер *h4* | м | 0,012 - |
| Размер *hs* | м | 0,016 |
| *Размер X* | ' м | 0,6 |
| Площадь сечения канала 1 *А і* | м2 | 0,619 |
| Площадь сечения канала 2 *А2* | м2 | 0,019 |
| Площадь поверхности теплообмена Л | м2 | 0,0072 |
| Массовый расход горячего теплоносителя (сплав натрий-калий - 25% Na, 75% К) G2 | кг/с | 1 |
| Массовый расход холодного теплоносителя (сплав натрий-калий - 25% Na, 75% К) *Gx* | кг/с | 1 |

Характеристики аппарата приведены в таблице 1 Контактная пара те-плопередающей стенки выбрана согласно имеющимся экспериментальным данным из условия обеспечения наибольшего эффекта термической асиммет­рии, материал канала 1 - сталь 1Х18Н9Т, материал канала 2 - алунд (А1203) Высокая степень выпрямления теплового потока в тесном контакте этих ма­териалов обусловлена характером зависимости их теплопроводностей от температуры (рисунок 11) с ростом температуры теплопроводность стали 1Х18Н9Т возрастает, теплопроводность алунда уменьшается

**24**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | • | 1Х18Н9Т | | пАлунд | |  |  |
|  |  | | | | | | | | |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ST |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *Л* |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **CD** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **^ 1П-** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5- |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 Т,К

Рисунок 11 - Теплопроводность стали 1Х18Н9Т и алунда в зависимости от температуры

Поскольку теплофизические свойства теплоносителей и материалов стенки изменяются в зависимости от координаты *X,* полную длину *X* раз­делим на *М* расчетных участков (рисунок 12) Тогда тепловая мощность © аппарата определится суммой мощностей *&т* на каждом участке

©==]Г©П

**ж=1**

(29)

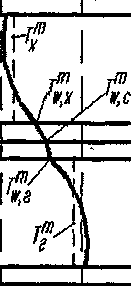
***У***

**А**

**- /**

***т***

***У***



***Г***

*/*

-5\*

**^**

***г***

***2***

***х<***

***х\****

***^х***

***Хт- ХМ-2***

***XU-t хи***

л« ... *А\_*

***Ч л1 л2 - лт-{***

Рисунок 12 - Температурное поле в теплообменном аппарате с двухслойной плоской стенкой (1 - 1Х18Н9Т, 2 - алунд)

25

Из-за малой площади стенки изменение температуры теплоносителей по длине каналов не превышает 1 К, что позволяет считать плотность тепло­вого потока в стенке приблизительно постоянной по длине канала

Для теплообменника с принятыми параметрами расчет проведен в диа­пазоне температуры теплоносителей 293 893 К. Значения плотности тепло­вого потока в теплопередающей стенке при постоянной температуре холод­ного теплоносителя показаны на рисунке 13, при постоянной температуре горячего теплоносителя - на рисунке 14 В обоих случаях значение характе­ристической функции /, показывающей степень выпрямления теплового по­тока, увеличивается с ростом градиента температуры в стенке и достигает наибольшего значения 1,243 при максимальной разности температур горяче­го и холодного теплоносителей, составляющей 600 К. В реальных устройст­вах температуры горячего и холодного теплоносителей изменяются одновре­менно, а их разность редко превышает 200 300 К, поэтому практически достижимые значения характеристической функции несколько меньше пре­дельного и составляют 1,1. 1,2

Таким образом, применение двухслойной теплопередающей стенки с высокой степенью выпрямления теплового потока позволяет управлять мощ­ностью теплообменного аппарата при сохранении входной температуры эв­тектики Na-K Значение характеристической функции *f,* определяющей, насколько сильно изменяется тепловая мощность, зависит от теплопроводно-стей материалов контактной пары и температур теплоносителей Свойства теплоносителей влияют только на теплоотдачу на поверхности стенки. По­скольку с увеличением теплоотдачи температуры на внешних поверхностях стенки стремятся к температурам теплоносителей, а степень теплового вы­прямления прямо пропорциональна градиенту температуры, увеличение теп­лоотдачи позволяет приблизить значение характеристической функции к максимальному Материалы контактной пары должны выбираться из условий зеркального изменения теплопроводностей в рабочем диапазоне температуры и допустимости тепловых нагрузок с точки зрения температуры плавления материалов.

Результаты проведенных расчетов позволяют сформулировать ряд ре­комендаций для эффективного решения задач теплового регулирования в космических энергетических установках

* для обеспечения наибольшей теплопередачи двухслойной системы тепловой поток должен передаваться со стороны материала, теплопровод­ность которого возрастает с увеличением температуры,
* для обеспечения наименьшей теплопередачи двухслойной системы тепловой поток должен передаваться со стороны материала, теплопровод­ность которого уменьшается с ростом температуры

26

- плотность теплового потока при подаче горячего теплоносителя в

канал 1 (1Х18Н9Т) ■ плотность теплового потока при подаче горячего теплоносителя в

канал 2(алунд)

СО.

***ь***

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **уи -** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **OU 1** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **о-** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

290 340 390 440 490 540 590 640 690 740 790 840 890 940

Т, К

Рисунок 13 - Плотность теплового потока в теплопере дающей стенке в зави­симости от температуры горячего теплоносителя при постоянной температуре холод­ного (293 К)

\* плотность теплового потока при подаче горячего теплоносителя в канал 1(1Х18Н9Т) —о— плотность теплового потока при подаче горячего теплонобителя в канал 2 (алунд)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ээ** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Ш^л** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **т"** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **1о -** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **о-** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

290 340 390 440 490 540 590 640 690 740 790 840 890 940

**Т, К**

Рисунок 14 - Плотность теплового потока в тешюпередающей стенке в зави­симости от температуры холодного теплоносителя при постоянной температуре горя­чего (893 К)

**27**

Согласно принятой классификации автоматических регуляторов ис­пользованная в теплообменнике двухслойная теплопередающая стенка отно­сится к статическим регуляторам прямого непрерывного действия. Извест­ные термоконтролирующие устройства (ТКУС) этого класса используют реальный биметаллический контакт, работа которого основана на тепловом расширении материалов контактной пары при нагреве со стороны материала с большим коэффициентом линейного расширения соединение сомкнуто, и система передает тепло, при нагреве со стороны материала с меньшим коэф­фициентом линейного расширения соединение разомкнуто, и теплопередача отсутствует Подобные тепловые диоды имеют небольшое контактное давле­ние, поэтому могут использоваться для теплоотвода и термостатирования систем с небольшими тепловыми мощностями приблизительно до несколь­ких киловатт Кроме того, реальные контакты, эффективные в качестве тер­мических переключателей, не позволяют производить точное регулирование теплового потока из-за начального разброса свойств взаимодействующих поверхностей и их изменения со временем

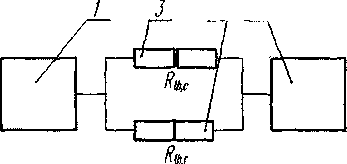
Плотность теплового потока, который может быть передан через тес­  
ный контакт, намного более значительна, поскольку не связана с характери­  
стиками поверхностей, а ограниче-  
- т . <\_ на свойствами самих материалов

Рисунок 15 - Комбинированная схема ТКУС с параллельным подключени­ем тесного и реального контактов (1, 2 -нагреватель и холодильник, 3 - реальный контакт, 4 - тесный контакт)

Совмещение временной ус­тойчивости характеристик тесных контактов и дискретности свойств реальных соединений в комбини­рованной схеме (рисунок 15) по­зволяет увеличить степень вы­прямления термоконтролирующего устройства при сохранении точно­сти регулирования В зависимости от направления теплового потока элементы 1, 2 выполняют функции нагревателя и холодильника. Вы­сокодискретный контакт 3 подключается параллельно с тесным контактом 4. При теплопередаче в прямом направлении соединение 3 сомкнуто, и кон­тактное термическое сопротивление ТКУС равно

***'* і і Г**

***Я***

*т,ткус*

**. + \_L\_ = ~~"-~~ *~~""~~* , (30)**

***R„***

***Я,***

*Я-thc + "th,r*

*\h,c \*yth,r J*

При теплопередаче в обратном направлении соединение 3 разомкнуто и кон­тактное термическое сопротивление ТКУС становится равным термическому сопротивлению тесного контакта.

**28**

*^th.TKVC \* Rth,r* (31)

Влияние сопротивлений тесного и реального контактов на степень выпрям­ления термоконтролирующего устройства и точность теплового регулирова­ния определяется их площадями с увеличением площади тесного соединения степень выпрямления ТКУС стремится к степени выпрямления его контакт­ной пары, а точность термического регулирования повышается, при увеличе-ниии площади реального контакта степень выпрямления ТКУС возрастает, а точность термического регулирования понижается

ВЫВОДЫ

1 Установлено, что для повышения эффективности создаваемых энер­гетических установок космического назначения необходимо решать ком­плекс задач, связанных с теплообменом в соприкасающихся конструктивных элементах Вместе с тем, современное состояние теории контактного тепло­обмена характеризуется определенными проблемами, обусловленными от­сутствием точно установленных причинно-следственных связей между пара­метрами термомеханического состояния систем, теплофизическими свойствами материалов и термическим сопротивлением контакта

2. Отмечено, что для объектов космической техники в условиях вакуу­ма при отсутствии конвективного переноса тепла в межконтактных зазорах теплопроводность через пятна фактического контакта является вместе с из­лучением основным - а при температурах менее 1000 К - единственным ме­ханизмом контактной термической проводимости Существенное различие номинальной и фактической площадей соединения приводит к тому, что при отсутствии тешгапроводящей среды в зазорах контактное термическое сопро­тивление практически равно сопротивлению стягивания Поскольку извест­ные расчетные соотношения сопротивления стягивания используют фиктив­ную теплопроводность или граничное условие 4 рода, противоречащее экспериментальным данным, выявлена необходимость углубленного изуче­ния фононной теплопроводности в соединениях твердых тел

3 Предложена физическая модель идеального контакта, позволившая найти его термическое сопротивление, данная величина представляет собой минимальное значение термического сопротивления, которое может иметь соответствующий тесный контакт

4. Теоретически обоснованно, что сопротивление тесного контакта не зависит от площади, а определяется исключительно теплофизическими и термодинамическими свойствами материалов. От площади зависит сопро­тивление стягивания, которое возникает в материале при стягивании линий теплового потока к местам фактического контакта и имеет значительную ве­личину Сопротивление стягивания проявляется только в реальных контактах

29

и стремится к нулю по мере приближения фактической площади к номиналь­ной

5 Получено и экспериментально подтверждено аналитическое выра­жение для расчета термического сопротивления стягивания

1. Рассмотрены причины термического выпрямления в контактах с ма­лой дискретностью, в результате чего отмечено, что в тесных контактах не­которых материалов может наблюдаться значительное (около 40%) выпрям­ление теплового потока, связанное с зависимостью теплопроводности материалов от температуры Теоретические предпосылки подтверждены ре­зультатами экспериментального исследования эффекта термического вы­прямления в тесном контакте Al-Si, в результате которого установлено, что плотность теплового потока при нагреве со стороны Si в 1,33 раза больше плотности теплового потока, возникающего в случае нагрева со стороны А1.
2. Выполнен расчет теплообменного аппарата, отразивший эффектив­ность применения контактов с малой дискретностью с целью теплового регу­лирования в энергетических установках КЛА и позволивший выработать ре­комендации для обеспечения оптимальной теплопередачи в двухслойных стенках'

* для уменьшения термического сопротивления системы двух соприка­сающихся материалов тепловой поток должен передаваться со стороны мате­риала, теплопроводность которого увеличивается с ростом температуры,
* для увеличения термического сопротивления двухслойной стенки те­пловой поток должен передаваться со стороны материала, теплопроводность которого уменьшается с ростом температуры

8 Разработана комбинированная схема терморегулируюшего устрой­ства, обеспечивающая увеличение передаваемого теплового потока и точ­ность регулирования по сравнению с существующими образцами за счет па­раллельного включения контактов с высокой и низкой дискретностью.

9. Результаты работы позволили сформулировать принципиально но­вую концепцию процессов теплопроводности в контактах твердых тел и вы­работать рекомендации, использование которых при проектировании энерге­тических установок КЛА обеспечивает повышение эффективности и надежности их конструкций. Разработанная физическая модель идеального контакта раскрыла неопределенность граничного условия 4 рода, образовав основу для аналитического исследования таких явлений в соединениях твер­дых тел, как макро- и микростягивание, нестационарные процессы в зоне возмущения с временем релаксации, меньшим времени микростягивания, теплопроводность микроскопических систем, в частности, поверхностных пленок толщиной порядка нескольких десятков ангстрем.

**зо**

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1 Викулов А.Г Взаимосвязь теплообмена и электрических явлений в контакте // XI Туполевские чтения- Всероссийская (с международным уча­стием) молодежная научная конференция Казань 8-10 октября 2003 года Тезисы докладов ТІ- Казань. Изд-во Казан гос техн ун-та, 2003 С 121. > . 2. Викулов А Г, Меснянкин С Ю Теплопроводность в идеальном кон­такте твердых тел // Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену В 8 томах Т 7 Радиационный и сложный теплообмен Тепло­проводность и теплоизоляция. - М . Издательский дом МЭИ, 2006 С 179-182

3 Викулов А Г Использование микроскопических свойств вещества для термодинамического анализа тепловых процессов // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А И Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетиче­ских установках» 21-25 мая 2007 г, Санкт-Петербург Т 2 -М Издатель­ский дом МЭИ, 2007 С 231-236

1. Викулов Д Г, Викулов А Г Применение свойств тесных контактов для теплового регулирования в космических энергетических установках // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руково­дством академика РАН А И Леонтьева «Проблемы, газодинамики и тепло­массообмена в энергетических установках» 21-25 мая 2007 г, Санкт-Петербург Т 2. - М • Издательский дом МЭИ, 2007 С 237-238
2. Викулов А Г Определение толщины поверхностных пленок посред­ством электрических измерений в контакте металлов // Вестник МАИ 2007 Т. 14 №2 -М МАИ, 2007 С 47-52

6 Патент РФ на полезную модель № 66039 «Датчик теплового пото­ка»

Подписано в печать 21 09 07

Бум офсетная Формат 60x84 1/16 Печать офсетная

Уел печ л 1,86 Уч -изд л 2,0

Тираж 100 экз Зак 3775

Отпечатано с готового оригинал-макета

Типография Издательства МАИ

«МАИ», Волоколамское ш , д 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993