

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**Применение тепловых труб для охлаждения
радиоэлектронных устройств**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы

направления 03.03.02 «Физика»

физического факультета

Бородиной Надежды Александровны

Научный руководитель,
д. т. н., профессор

А.Л. Хвалин

Зав. кафедрой,
д. ф.-м. н., профессор

А.А.Игнатъев

Саратов 2016

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Современные радиоэлектронные устройства (РЭУ) непрерывно совершенствуются, что значительно усложняет решение проблемы обеспечения необходимого теплового режима разрабатываемых устройств. Это связано с тем, что в единице объема размещается все большее количество электронных элементов, тем самым увеличивая плотность рассеиваемой тепловой мощности. Таким образом, традиционные способы отвода тепла не всегда достаточно эффективны.

В последнее время при проектировании РЭУ акцент делается на комплексную миниатюризацию, и наиболее эффективным способом обеспечить заданный тепловой режим является применение тепловых труб, работающих по принципу замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Тепловые трубы (ТТ) способны эффективно отводить тепло от труднодоступных теплонапряженных элементов, снижать температурный перепад по конструкции и корпусу устройства, заметно уменьшать размеры и массу систем охлаждения, улучшать их рабочие характеристики, избежав установки громоздких и дорогостоящих способов отвода тепла, и тем самым создавать конструкции РЭУ, наиболее оптимально соответствующие современным требованиям.

Действительно, используя теплоотводы на основе ТТ, можно решать следующие задачи:

- переносить большое количество теплоты при малых перепадах температур и минимум тепловых потерь;
- разделять в пространстве тепловой поток по нескольким направлениям с различной нагрузкой;
- изменять и/или поддерживать температуру охлаждаемого объекта, регулируя плотности тепловых потоков;
- создавать теплопередающие устройства с функцией теплового диода.

Последнее время снова начали активно использовать ТТ в системах обеспечения теплового режима РЭУ, хотя использование ТТ в РЭУ известно с

конца 60-х годов. Новая волна массового применения ТТ в электронной индустрии началась в начале 2000-х годов. ТТ применяют в узлах и блоках РЭУ с элементами повышенной мощности для отвода тепла как от единичного элемента, так и от группы элементов. Сегодня, к примеру, практически все ноутбуки высокого класса снабжены системой охлаждения на основе тепловых труб.

На кафедре общей физики и в ОАО «Институт критических технологий» разработан оригинальный датчик слабых магнитных полей, который, в частности, является основой для векторного магнетометра геомагнитного поля. Однако чувствительный элемент датчика – полупроводниковый автогенератор с ферритовым элементом в цепи обратной связи и постоянным магнитом для системы подмагничивания ферритового элемента – заметно реагирует на изменение своей температуры. Поэтому желательна температурная стабилизация чувствительных элементов датчика.

Цель работы. Целью настоящей работы являлось исследование возможности применения тепловых труб в конструкциях гетеромагнитного датчика геомагнитного поля для регулируемого отвода тепла от термостатируемой области датчика, возможно, создаваемой на основе элементов Пельтье.

Структура и объем выпускной квалификационной работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложения и списка использованных источников.

Работа изложена на 51 странице, в том числе 32 страницы в основном тексте, включая 19 рисунков, и 3 страницы в приложении. В списке использованной литературы 76 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе рассмотрен принцип работы и типовые конструкции тепловых труб.

Тепловые трубы (ТТ) характеризуются следующими основными свойствами:

1. Высокая эффективная теплопроводность. Тепловые трубы обладают эффективной теплопроводностью в сотни раз выше, чем материалы, имеющие самую высокую теплопроводность, например, медь.

2. Изотермичность теплообменных поверхностей тепловой трубы. Это свойство в значительной степени определяет уникальность тепловой трубы как теплообменного устройства. Оно связано с тем, что теплообмен в тепловых трубах осуществляется при испарении и конденсации рабочего тела. А эти процессы, как известно, протекают для большинства веществ в заданных условиях при постоянной температуре.

3. Способность передавать теплоту при плотности теплового потока в осевом направлении на несколько порядков выше, чем в устройствах, где теплота передается за счет изменения энтальпии теплоносителя. Это свойство обусловлено тем, что в тепловых трубах в процессе теплопередачи используется скрытая теплота парообразования.

4. Относительная простота конструкции.

С помощью тепловых труб можно решать следующие задачи:

1. Обеспечение пространственного разделения источника и стока теплоты. Высокая эффективная теплопроводность ТТ позволяет передавать с ее помощью теплоту на значительные расстояния при малом температурном напоре. Во многих случаях, когда требуется охлаждение отдельных элементов, может оказаться неудобным или нежелательным отвод теплоты с помощью стока или радиатора, расположенных непосредственно у охлаждаемого элемента. Например, отвод теплоты от устройства, выделяющего большую мощность и расположенного внутри модуля, в котором кроме него также находятся другие чувствительные к температуре элементы, целесообразно

осуществить с помощью ТТ, соединяющей это охлаждаемое устройство со стоком, расположенным вне модуля. При этом с помощью тепловой изоляции можно свести к минимуму тепловые потери от промежуточных секций ТТ.

2. Выравнивание температуры. Поскольку ТТ по своей природе стремится к работе в условиях равномерной температуры, ее можно использовать для снижения градиентов температуры между неодинаково нагретыми участками тела. Таким телом может являться наружная оболочка спутников, одна сторона которой обращена к солнцу, тогда как другая, более холодная, находится в тени. В другом случае, цепочки элементов электронных устройств, размещенных на одной и той же трубе, оказываются термически связанными, при этом их температуры выравниваются.

3. Трансформация теплового потока. Например, в термоионных преобразователях была предпринята попытка трансформировать тепловой поток сравнительно малой плотности, выделяемый радиоактивными изотопами, в тепловой поток большой плотности, достаточной для его эффективного использования в термоионных генераторах.

4. Регулирование температуры. Лучше всего реализуется с помощью ТТ переменной проводимости, которую можно использовать для тонкого регулирования температуры устройства, размещенного на ее испарителе.

5. Передача теплоты только в одном направлении (тепловой диод).

Во втором разделе рассмотрены современные тепловые трубы для охлаждения наземных электронных систем и их применение.

Набор тепловых труб, используемых в электронике, довольно разнообразен. Некоторые из труб, используемые для охлаждения интегральных схем, имеют толщину 1 мм и ширину 7 мм, поперечное сечение других составляет 25x12 мм. Если первые могут передавать мощность 12,5 Вт, то последние 150 Вт.

Микро- и миниатюрные ТТ – это устройства очень малых размеров, в которых использован испарительно-конденсационный цикл классических тепловых труб. Микро- и миниатюрные ТТ круглой формы диаметром от 0,3 до

6 мм получили наибольшее распространение. Их корпус изготавливается из меди, в качестве теплоносителя используется дистиллированная вода, этанол, метанол или ацетон. В основном применяются в радиоэлектронной промышленности для охлаждения миниатюрных маломощных тепловыделяющих элементов.

Технология изготовления микро- и миниатюрных ТТ из меди широко развита. Детальный теоретический анализ процессов, происходящих внутри таких ТТ в зонах испарения и конденсации, приведены во многих работах. Существует ряд работ, посвященных тепловому анализу систем обеспечения теплового режима (СОТР) с ТТ для компьютеров. Показано, что две ТТ позволяют отводить около 36% общей теплоты от процессора, а четыре ТТ — около 48%. Общее термическое сопротивление всей системы охлаждения процессора равно $0,24^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Проблема обеспечения теплового режима РЭА при высоких плотностях теплового потока привела к созданию так называемых паровых камер, эффективность применения которых на сегодняшний день подтверждена многочисленными научными исследованиями и массовостью их производства для серверных систем.

Паровая камера представляет собой плоскую миниатюрную ТТ, ее основная функция - снижение плотности теплового потока за счет увеличения поверхности теплоотвода. Паровые камеры используются как элементы радиаторов.

В настоящее время ведутся работы по совершенствованию капиллярных структур для паровых камер. Так, например, приведены результаты работ по изготовлению новой порошковой капиллярной системы методом инъекционного литья металла. Ее пористость составляет более 53%. Теплопроводность ПК на основе такой капиллярной системы в 20 раз выше теплопроводности ТТ диаметром 10 мм. Тестовые данные показали, что использование новой ПК повысила эффективность системы охлаждения на 33%.

Плоские ТТ только недавно начали широко внедряться в СОТР РЭА. Их достоинством является возможность отводить теплоту сразу от нескольких элементов без специальной контактной поверхности. Активно используются для охлаждения центральных и графических процессоров, модулей памяти FBDIMM и UDIMM, систем освещения, оптических модулей связи, телекоммуникационного сетевого оборудования и электронных модулей с высокой мощностью.

Особый интерес представляют гибкие ТТ, которые позволяют в условиях плотной упаковки электронных систем оптимизировать направления отводимых тепловых потоков.

Первые коммерческие гибкие ТТ для наземного применения появились только в 2000-х годах. Так, в 2004 году компания FURUKAWA представила гибкую ТТ «Pera-flex», изготовленную из металлической фольги и тампонной материи, которые для повышения смачиваемоститеплоносителем были покрыты специальным материалом. Толщина такой ТТ 0,7 мм, длина 150 мм, ширина 20 мм, термическое сопротивление 1,0 К/Вт при передаваемой мощности 4 Вт. Испытания показали, что при угле сгиба ТТ 90° и радиусе изгиба 1 см теплопередающая мощность составляет 6 Вт.

В последнее время наблюдается постоянное увеличение интереса к созданию гибких ТТ, особенно из неметаллических материалов.

Контурная тепловая труба является пассивной двухфазной системой с капиллярной прокачкой жидкости и может рассматриваться как элемент систем охлаждения РЭА. Основные преимущества контурной ТТ заключаются в том, что система охлаждения на их основе функционирует при любой ориентации в пространстве практически без изменения своих характеристик, остается работоспособной в движущихся системах при больших ускорениях (5g и более), а также позволяет обеспечить гибкую связь между зонами подвода и отвода тепла.

Пульсационная тепловая труба (ПТТ) рассматривается как новый тип ТТ, перспективный для использования в СОТР РЭА, основное преимущество

которой заключается в отсутствии КС, что делает более дешевой технологию их изготовления. Конструкция ПТТ представляет собой систему из множества петель, образующих достаточно эффективную поверхность для теплоотдачи без использования дополнительных радиаторов. Важным является и то, что ПТТ могут работать при любой ориентации в гравитационном поле, а также при движении с большим ускорением.

ТТ с постоянным термическим сопротивлением и термосифоны широко используются сегодня в различных СОТР РЭА с мощностью от 50 Вт и выше.

В третьем разделе рассмотрена теория переноса тепла в так называемых газорегулируемых тепловых трубах (ГРТТ), принципиальная схема которых показана на рисунке 1.

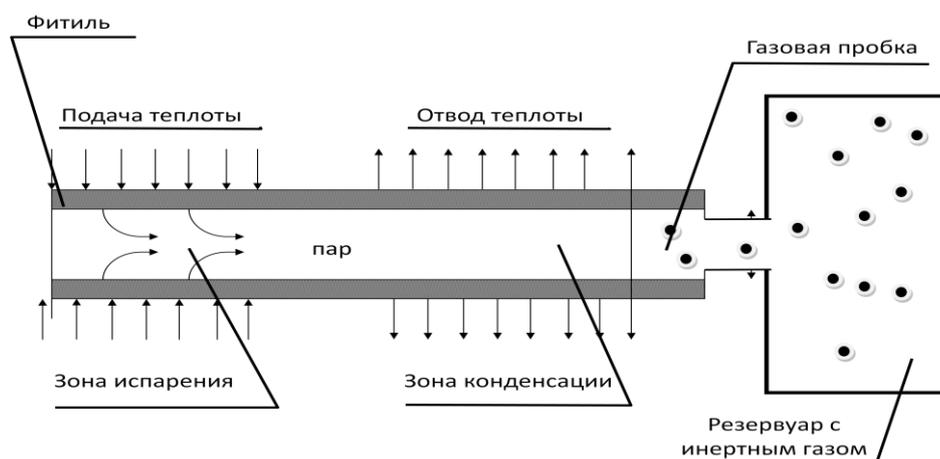


Рисунок 1 - Схема газорегулируемой тепловой трубы.

В простейшем случае ГРТТ состоит из обычной ТТ и присоединенного к ней резервуара с инертным неконденсирующимся газом. Генерируемый объектом тепловой поток проникает через зону испарения внутрь ТТ и переносится потоком пара в зону конденсации. При этом преодолевается напор инертного газа (газовая пробка), основная масса которого находится в подключенном к ТТ резервуаре. Участок конденсации принудительно охлаждается через стенку ТТ.

При достаточно низкой температуре охлаждаемого объекта пар и газ внутри устройства находятся в равновесном состоянии. Перенос теплоты через ГРТТ осуществляется практически только вдоль ее стенки благодаря теплопроводности, диффузия же пара внутри ТТ невелика. При определенных условиях пар начинает вытеснять из рабочего канала инертный газ, подходя к зоне конденсации. Этот момент наступает, когда внутри ГРТТ устанавливается направленный поток пара. Тепловая проводимость такой ТТ возрастает на несколько порядков, и ГРТТ начинает охлаждать объект, пока не наступит обратное смещение границы раздела пар-газ и не прекратится прямой контакт пара с холодной стенкой конденсационной зоны. За пределами границы раздела пар-газ действие ТТ прекращается, и температура падает. Колебание теплового потока в зоне испарения ГРТТ приводит к пропорциональному изменению длины рабочего участка конденсации и объема парового пространства. Следовательно, при различных режимах работы давление пара внутри ГРТТ меняется незначительно благодаря большому объему резервуара с газом.

В данном разделе на основе литературных источников описана математическая модель ГРТТ и приведены выражения, связывающие между собой параметры тепловой трубы, температуры зон испарения и конденсации и величину тепловой мощности, которую необходимо отвести с помощью ГРТТ.

В четвертом разделе предложена система двойной термостабилизации элемента электронного устройства на базе термоэлектрического модуля Пельтье (ТЭМ) и газорегулируемой тепловой трубы, отводящей суммарный тепловой поток от горячей грани модуля Пельтье.

Например, необходимо термостабилизировать чувствительный элемент (первичный преобразователь) гетеромагнитного датчика геомагнитного поля.

Первичный преобразователь является одним из элементов датчика в целом. Поскольку в состав датчика входят электронные платы управления, частотомер, делители питающего напряжения и т.п., термостабилизировать весь датчик нецелесообразно. При тепловой стабилизации только первичных преобразователей с помощью ТЭМ Пельтье возникает конструктивная

проблема отвода тепла от самого ТЭМ, так как первичный преобразователь должен иметь собственный корпус, играющий роль электромагнитного экрана. Предполагается, что данная конструктивная проблема может быть решена с помощью газорегулируемой тепловой трубы. Предполагаемая конструкция представлена на рисунке 2.

Первичный преобразователь закреплен на холодной грани ТЭМ с помощью некоторых конструктивных элементов, форма которых зависит от варианта конструкции самого первичного преобразователя. Горячая грань ТЭМ контактирует с изотермической зоной испарения ГРТТ, а зона конденсации трубы выносится за пределы внешнего корпуса датчика и сочленяется с радиатором того или иного типа. Желательно первичный преобразователь и холодную грань ТЭМ закрыть плохо теплопроводной оболочкой.

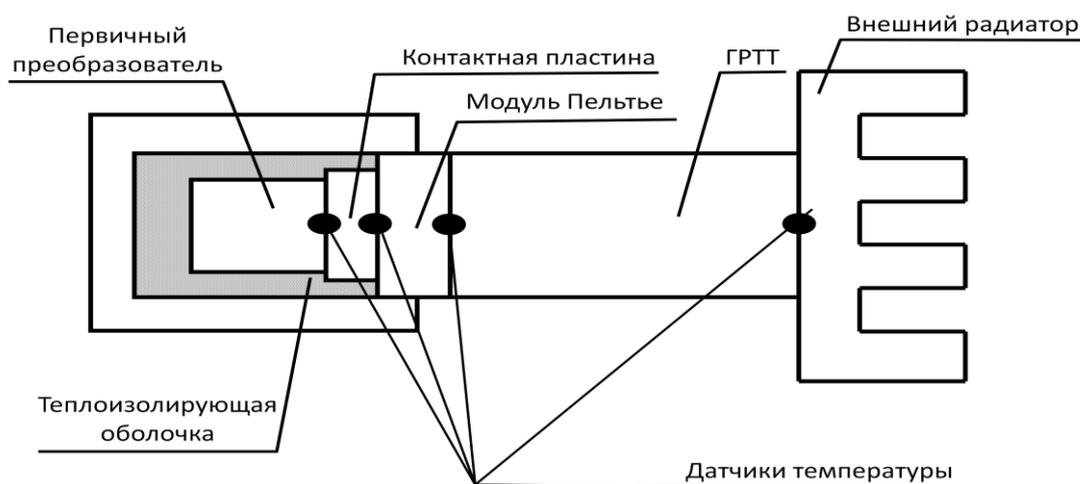


Рисунок 2 – Схема системы термостабилизации первичного преобразователя датчика геомагнитного поля.

ГРТТ сама обладает способностью стабилизировать температуру зоны испарения при изменении температуры окружающей среды. Конструкцию ГРТТ необходимо согласовывать с конструкцией датчика в целом на этапе его разработки. При этом необходимо знать величину максимальной тепловой мощности, отводимой с помощью ГРТТ, задаваемую температуру стабилизации и возможный диапазон изменений температуры окружающей среды.

Поскольку ГРТТ будет стабилизировать температуру горячей грани ТЭМ, то изменение тока питания ТЭМ при изменении температуры среды будет незначительным, то есть условия работы ТЭМ можно оптимизировать. Следовательно, тепловая мощность, отводимая ГРТТ в среду, складывается из мощности рассеяния первичного преобразователя и тепловых потерь в ТЭМ, которые тоже будут достаточно стабильными.

Если обозначить суммарную тепловую мощность, переносимую тепловой трубой, через Q_{max} , то эту величину можно связать с температурным перепадом по длине ГРТТ, параметрами жидкости и ее пара в трубе и характеристиками капиллярной системы.

В итоге было получено соотношение для температуры горячей поверхности $T_{ГП}$ модуля Пельтье, сопряженной с зоной испарения ТТ:

(1)

где T_{CP} – температура окружающей среды;

R_{TI} - тепловое сопротивление конструкции сопряжения модуля Пельтье с ТТ;

R_{TII} - тепловое сопротивление собственно ТТ;

R_{TIT} - тепловое сопротивление теплоотвода в зоне «конденсация ТТ-окружающая среда».

В формуле (1) соответствует суммарной тепловой мощности, генерируемой в охлаждаемом объекте и модуле Пельтье.

На этой основе производится выбор промышленной тепловой трубы, удовлетворяющей требованиям обеспечения стабильности температуры горячей грани модуля Пельтье. Таким способом обеспечивается двойная стабилизация температуры первичного преобразователя для повышения точности его показаний. Однако ценовые параметры и энергетические показатели такой системы термостабилизации в настоящей работе не оценивались.

В приложении содержится номенклатура ряда промышленных тепловых труб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящей работе был рассмотрен принцип работы различных тепловых труб, проведен обзор их свойств и областей применения;

2. Для термостабилизации радиоэлектронных элементов наиболее эффективны ГРТТ, с помощью которых возможна термическая стабилизация электронного компонента с погрешностью около 3°C относительно заданного уровня;

3. На основе литературных источников рассмотрена простая математическая модель ГРТТ и определена тепловая мощность, переносимая тепловой трубой в зависимости от температурного перепада между зонами испарения и конденсации, геометрии трубы, параметров фитильной системы и теплоносителя;

4. Предлагается система термостабилизации первичного преобразователя гетеромагнитного датчика магнитного поля в виде совокупности модуля Пельтье и ГРТТ. У такой системы имеется только один недостаток – большие энергетические затраты на работу модуля Пельтье. С другой стороны, при снижении температуры окружающей среды в отрицательную область подбором параметров тепловой трубы можно привести ее в нерабочее состояние (тепловой диод) в этих условиях и автоматически изменить полярность тока питания элемента Пельтье, превратив его в нагреватель.

Результаты настоящей работы будут использованы в ОАО «Институт критических технологий» при разработке навигационных систем.