

МИНОБРНАУКИ РОССИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
**«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНФОРМАЦИОННЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**
(ФИЦ ИВТ)

Проспект Академика Лаврентьева, д. 6, г. Новосибирск, 630090
Тел.: +7 (383) 330-6150, факс: +7 (383) 330-6342, e-mail: ict@ict.nsc.ru
ОКПО 05222159, ОГРН 1025403650920, ИНН/КПП 5408105390/540801001



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ФИЦ ИВТ

д.ф.-м.н.

С.Б. Медведев

26 февраля 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе **Соколова Никиты Юрьевича**
**«Улучшение характеристик системы тепловых труб для охлаждения
радиоэлектронного оборудования»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника

1. Актуальность работы для науки и практики

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежности функционирования и улучшения характеристик радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в жестких условиях эксплуатации при тепловых воздействиях, возникающих в бортовых системах космических аппаратов (КА). Разработка новых моделей негерметичных КА с увеличенным сроком активного существования (САС) до 15 лет и повышенным уровнем энергообеспечения (более 5 кВт) требует создания оптимального теплового режима для РЭА при выполнении требований снижения её массы и объема, что возможно только за счет повышения эффективности работы систем отвода тепла. Одним из направлений решения данной проблемы является конструктивно-технологическое совершенствование систем охлаждения радиоэлектронного оборудования КА и повышение их технических характеристик.

Основной принцип функционирования системы обеспечения теплового режима КА заключается в поддержании требуемого диапазона температур на посадочных местах тепловыделяющего оборудования КА при заданных уровнях энергопотребления. Наиболее предпочтительным средством реализации этого принципа являются тепловые трубы (ТТ), работающие на основе замкнутого испарительно-конденсационного цикла. ТТ отличаются высокой эффективной теплопроводностью, в десятки раз превышающей теплопроводность металлов. Они обеспечивают эффективный отвод тепла от теплонагруженных электрорадиоизделий (ЭРИ), позволяют трансформировать плотность тепловых потоков, разнести в пространстве источник и приемник теплоты, стабилизировать температуру и уменьшить неравномерность температурного поля по конструкции РЭА. В отличие от систем, имеющих жидкостный контур охлаждения с

принудительной циркуляцией теплоносителя, системы из тепловых труб не потребляют электроэнергии, значительно выигрывают в массе и надежности. В настоящее время разработан новый класс плоских ТТ, встраиваемых в несущую конструкцию блока РЭА – гипертеплопроводящая секция (ГТПС), отличающийся оригинальной конструкцией корпуса. Увеличение отводимой мощности от ЭРИ обеспечивается за счет параллельного соединения ТТ, либо за счет увеличения объема пористой структуры ТТ.

Основная идея работы Соколова Н.Ю. заключается в разработке инновационной методики снижения массогабаритных характеристик приборов КА, основанной на применении новой математической модели ТТ для описания термодинамических характеристик систем охлаждения, состоящих из ТТ. Отличительной особенностью предложенной математической модели от существующих является то, что в качестве критерия принято уменьшение массы системы ТТ и снижение температурного запаса ЭРИ.

Результаты расчета по математической модели подтверждены экспериментально на созданной установке системы ТТ (состоящей из двух ГТПС). Разработанный на этой основе блок приборов КА обладает оптимальными массогабаритными характеристиками. Система термостабилизации и регулирования (СТР) современных КА, выпускаемых АО «Решетнев», обеспечивает температуры посадочных мест бортовой аппаратуры (БА) в диапазоне от минус 10 до плюс 40 °С. Максимальная рабочая температура ЭРИ определена техническими условиями производителя ЭРИ с учетом САС КА, выполнение которых обеспечено результатами, полученными в работе.

Основные положения научной новизны связаны с разработкой методических расчетно-экспериментальных основ создания эффективных систем охлаждения РЭА и с детальным научным исследованием в лабораторных и полунатурных условиях на стендах собственных конструктивных решений систем теплоотведения на базе ТТ. Обобщены в безразмерном виде и проанализированы известные результаты исследований СТР, которые получили развитие в рамках диссертационной работы. Численный анализ проводился с применением программного комплекса ANSYS, использовались методы теории тепломассообменных процессов, математического моделирования, вычислительной математики.

Теоретическая значимость исследования заключается в создании новой модели и алгоритма для расчета теплопередачи в СТТ, позволяющих на ранних этапах проектирования максимально достоверно определять основные параметры системы охлаждения. Полученные результаты являются теоретической основой для проведения инженерно-исследовательских работ, компьютерного моделирования, проектирования, оптимизации и автоматизации оборудования РЭА с использованием методов теоретической и прикладной теплотехники.

Практическая значимость работы определяется предложениями по усовершенствованию технологий и оборудования для расчетно-аналитического анализа, позволяющего максимально достоверно сформировать на ранних этапах проектирования структуру и конструкцию СТТ по массогабаритным и энергетическим характеристикам. Разработанная методика может быть использована при проектировании новых конструкций модулей бортовой РЭА КА. Предложенные в работе методы и подходы анализа тепломассообменных процессов для оптимизации массогабаритных и энергетических характеристик СТР могут быть применены в других областях техники и технологии.

Таким образом, комплекс научных исследований, выполненный Н.Ю. Соколовым, имеет все основания рассматриваться как соответствующий требованиям актуальности, научной новизны и практической значимости. Уровень поставленной научной задачи соответствует диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук. Постановка и решение задач исследования

соответствуют требованиям паспорта специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника.

2. Структура диссертации и общая характеристика работы

Материалы диссертации изложены на 150 страницах основного текста, включающего 102 рисунка и 13 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 98 наименований и списка сокращений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также приведены методология исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе проведен анализ существующих методов расчета в области конструирования и проектирования ТТ, а также обзор методов и технологий развития в области теплового проектирования несущих конструкций РЭА с интегрированными ТТ, дана конкретизация предмета и методов исследования. Результаты анализа проведенного обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки задач диссертации и их поэтапного решения теоретическими и экспериментальными методами.

Второй раздел посвящен развитию математического моделирования в области теплофизических процессов и созданию новой математической модели оптимизации массогабаритных характеристик системы тепловых труб (СТТ) во всем диапазоне рабочих температур на базе цилиндрических ТТ и ГТПС. Система тепловых труб представляет собой последовательное соединение минимум двух ТТ с целью увеличения КПД общей системы охлаждения. Численный расчет массогабаритных характеристик по предложенной модели СТТ выполнен на базе цилиндрических медно-водяных ТТ для одиночного нагревателя по расчетной схеме модуля РЭА КА. Аналогичные расчеты выполнены для медной ГПТС и двух титановых ГТПС. Результаты численных расчетов с использованием пакета ANSYS в рамках предложенной модели и алгоритма позволили оптимизировать конструктивно-технические характеристики СТТ и дать рекомендации по их применению в РЭА КА. С другой стороны, разработанные вычислительные алгоритмы и модели могут служить основой для создания универсальной платформы (цифрового двойника) проектирования систем терморегулирования КА.

В третьем разделе приведена методика проведения экспериментальных работ. Представлены разработанные автором стенды для их проведения. Целью исследования являлось измерение теплофизических характеристик разработанных СТТ, а также оценка предельных значений тепловых нагрузок, при которых начинается осушение фитиля в результате достижения капиллярного или других ограничений. Эксперименты проводились при разных температурах. В ходе каждого эксперимента мощность тепловыделения нагревателя увеличивалась ступенчато. Мощность нагревателя рассчитывалась как произведение электрического тока на разность потенциалов, измеряемая непосредственно на контактах нагревателя.

Четвертый раздел посвящен анализу результатов экспериментальных исследований СТТ. Установлены значения отводимой тепловой мощности к массе одиночной ТТ, двухуровневой СТТ с разными теплоносителями в условиях гравитационного поля:

- 667 Вт/кг для СТТ на базе медно-водяных цилиндрических ТТ при вертикальной ориентации на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности с температурой минус 5 °С, 1167 Вт/кг при температуре термостабилизированной поверхности 40 °С;

- 690 Вт/кг для СТТ на базе титановых ГТПС при вертикальной ориентации на расстоянии 0,065 м от термостабилизированной поверхности с температурой 25 °С.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 8 статей в журналах из перечня ВАК РФ, одна – МБД SCOPUS; 8 работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций. Автореферат, публикации и апробация работы в полной мере отражают её научное содержание.

3. Новые научные результаты

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы следует признать:

1. Решена задача создания систем термостабилизации и регулирования бортовой РЭА КА с оптимальными массогабаритными и энергетическими характеристиками с использованием тепловых труб во всем диапазоне рабочих температур в условиях влияния факторов космического пространства.

2. Математически сформулирована модель, разработаны алгоритм и программа расчетного анализа процессов терморегулирования систем тепловых труб, позволяющих решать конструкторско–технологические задачи проектирования СТТ различных модификаций на основе унификации вычислительных процедур и экспериментального обоснования.

3. Для медно–водяных цилиндрических ТТ (одиночной и двухуровневой СТТ), титановых ГТПС установлены предельные значения отводимой тепловой мощности по отношению к массе СТТ с различными видами теплоносителей в условия влияния гравитационного поля, что позволило дать рекомендации для практического использования в перспективных КА.

4. Практическая значимость результатов работы

Разработано программное обеспечение, позволяющее провести расчетно-аналитический анализ и максимально достоверно сформировать на ранних этапах проектирования структуру и конструкцию СТТ по массогабаритным и энергетическим характеристикам. Разработанная методика может быть использована при проектировании новых конструкций модулей бортовой РЭА КА. Методы и подходы, развитые в работе в части анализа процессов тепломассообмена могут быть применены в других областях техники и технологии.

5. Замечания по диссертационной работе

1. При формулировке математической модели оптимизации массогабаритных характеристик СТТ (глава 2) целесообразно было дать более подробное описание процедур расчета, их последовательность и предоставить схему алгоритма.

2. Представленные результаты модельных расчетов и экспериментальных исследований (главы 3. 4) не получили прямой сравнительной оценки, что позволило бы более корректно представить положительные эффекты, практические приложения работы и верифицировать общие выводы по работе.

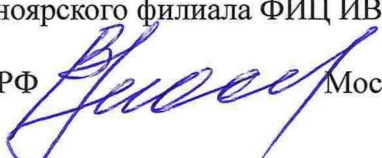
3. Следовало дать оценку влияния погрешностей экспериментальных измерений на конечные результаты достаточно сложных по своей постановке экспериментов (глава 4).

Указанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку диссертационной работы, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

6. Общее заключение по диссертационной работе

Диссертация по своей постановке, научной новизне и практической значимости полученных результатов соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника, имеет внутреннее единство и является законченной научно-квалификационной работой, в которой решается важная научно-практическая задача повышения теплопередающей способности систем охлаждения с интегрированными тепловыми трубами, содержащая новые результаты. Диссертация полностью соответствует требованиям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 25.01.2024), а её автор Соколов Никита Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен и одобрен на заседании научно-практического семинара «Проблемы природно-техногенной безопасности» лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Красноярского филиала ФИЦ ИВТ 25 января 2024 г., протокол № 1. Присутствовали на заседании 10 человек. Результаты: «за» - 10 человек, «против» - нет, «воздержались» – нет.

Отзыв подготовил председатель научно-практического семинара «Проблемы природно-техногенной безопасности»,
научный руководитель Красноярского филиала ФИЦ ИВТ,
д-р техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ  Москвичев Владимир Викторович

Директор Красноярского филиала ФИЦ ИВТ
канд. техн. наук  Буров Андрей Ефимович

Почтовый адрес: 660049, г. Красноярск, проспект Мира, д. 53
Тел. раб.: +7(391)227-29-12;
E-mail: krasn@ict.nsc.ru

Я, Москвичев Владимир Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.


Подпись

Я, Буров Андрей Ефимович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.


Подпись

Подписи Москвичева Владимира Викторовича и Булова Андрея Ефимовича заверяю:

ученый секретарь Красноярского филиала ФИЦ ИВТ
канд. техн. наук  Наталья Александровна Чернякова

