

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Дектерева Александра Анатольевича на диссертацию 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

Представленная диссертация посвящена улучшению характеристик системы охлаждения радиоэлектронного оборудования на основе тепловых труб. Рост мощности радиоэлектронных систем приводит к необходимости совершенствования методов их охлаждения. Особенно это актуально для радиоэлектронного оборудования космических аппаратов, так как наряду с необходимостью отведения тепла от элементов оборудования системы охлаждения должны иметь малые массогабаритные характеристики. На существующих космических аппаратах широко применяются системы отвода тепла с использованием тепловых трубы, работающих на основе замкнутого испарительно конденсационного цикла. Эффективная теплопроводность тепловых труб в десятки раз превышает теплопроводность металлов. Отсутствие в таких системах охлаждения подвижных механических частей обеспечивает длительный срок их эксплуатации и высокую надежность в сравнении с другими системами охлаждения. Однако, на современном уровне развития радиоэлектронного оборудования необходимо дальнейшее совершенствование систем отведения тепла. В связи с этим результаты диссертационной работы Соколова Н.Ю. являются весьма важными и **актуальными**.

Основная идея, предлагаемая автором, заключается в использовании не одиночных, а составных тепловых труб, что позволяет при уменьшении массы теплоотводящей системы значительно увеличить отводимую тепловую мощность. Предлагаемая идея автором работы теоретически обоснована и подтверждена экспериментально.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемых источников, содержащего 108 наименований, и приложения. Текст диссертации изложен на 128 страницах, содержит 48 рисунков и 1 таблицу.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель и сформулированы задачи работы, дана общая характеристика работы, представлены научная новизна и практическая значимость, приведен список положений, выносимых на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы в области теплового проектирования несущих конструкций радиоэлектронного оборудования с интегрированными тепловыми трубами. Проведен анализ существующих методов расчета в области конструирования и проектирования тепловых труб. В заключение показано, что для решения задачи оптимизации системы охлаждения необходимо разработать корректную математическую модель,

учитывающую все значимые особенности системы теплоотвода составных тепловых труб, позволяющую на ранних этапах проектирования выполнять оценки влияния режимных, геометрических и теплофизических параметров на характеристики системы охлаждения и выбора ее оптимального варианта. Результаты обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки решаемых в диссертации задач.

Вторая глава посвящена описанию математической модели для расчета системы цилиндрических и плоских гиперпроводящих тепловых труб и во всем диапазоне рабочих температур. Предложен алгоритм расчета и оптимизации их массогабаритных характеристик систем тепловых труб. Выполнены сравнительные расчеты для систем теплоотвода со стандартными тепловыми трубами (ТТ), гипертемпературопроводящими поверхностями (ГТПС) и составными тепловыми трубами (СТТ).

Для системы на базе цилиндрических медно-водяных тепловых труб для одиночного нагревателя площадью $4 \cdot 10^{-4}$ м² с тепловыделением 20 Вт, 30 Вт расположенного на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности с температурой 5°C, показано, что отведение 30 Вт обеспечивается одиночной тепловой трубой массой 74 г., а двухуровневой составной тепловой трубе достаточно массы 28 г.

Расчетная оптимизация массогабаритных характеристик системы тепловых труб на базе медной ГТПС выполнена для одиночного нагревателя площадью $2 \cdot 10^{-4}$ м² на максимальном расстоянии от термостабилизированной поверхности во всем диапазоне рабочих температур РЭА. Анализ результатов показал, что наиболее эффективным техническим решением во всем диапазоне рабочих температур является двухуровневая СТТ с водой в качестве теплоносителя. Двухуровневая СТТ обеспечивает увеличение отводимой тепловой мощности на 60% относительно ГТПС без изменения площади нагревателя.

Проведена оптимизация массогабаритных характеристик СТТ на базе двух титановых ГТПС соединенных последовательно. Площадь соединения ГТПС составляет $S \approx 9 \cdot 10^{-4}$ м². Толщина ГТПС составляет $2,1 \cdot 10^{-3}$ м. Одиночный нагреватель площадью $2,25 \cdot 10^{-3}$ м² расположен вертикально, нижняя граница находится на расстоянии 0,065 м от термостабилизированной поверхности с температурой 25°C. Расчеты проведены для вертикальной ориентации ГТПС в поле действия гравитационных сил. Результаты расчетов показывают, что СТТ (две ГТПС) обеспечивают отведение 60 Вт, при этом температура нагревателя не превышает 67°C. Капиллярная нагрузка распределена равномерно по обеим ГТПС, при тепловой мощности 60 Вт осушения нет во всем внутреннем объеме ГТПС

Третья глава посвящена методике экспериментальных исследований теплофизических характеристик разработанных составных тепловых труб. Проведено описание разработанного специального стенда для с рабочими участками систем цилиндрических ТТ и систем ГТПС. Выполнена оценка погрешности измерения теплофизических параметров.

В четвертой главе описаны результаты экспериментальных исследований СТТ. Исследования показали увеличение отводимой тепловой мощности от нагревателя в результате преобразования одиночных ТТ в двухуровневую СТТ во всем диапазоне рабочих температур РЭА.

По результатам эксперимента СТТ при температуре основания минус 5°C обеспечивает отвод тепловой мощности не более 20 Вт, при температуре основания 40°C обеспечивает отвод тепловой мощности не более 35 Вт. Для условий эксперимента масса составных цилиндрических ТТ составляет 26 г. Согласно численному расчету СТТ этой мощности и перегреву в зоне соединения соответствует масса 30 г, что хорошо коррелирует с экспериментом.

СТТ на базе медно-водяных цилиндрических ТТ с составным артериальным фитилем превосходит по эффективности титановую ГТПС в 4–8 раз (в зависимости от температуры термостабилизированной поверхности).

Наиболее значимыми результатами диссертации являются создание новой модели и алгоритма расчета процессов тепломассообмена в СТТ, позволяющих на стадии проектирования определять основные параметры системы охлаждения.

Обоснованность и достоверность результатов работы основывается на корректном применении методов теории тепломассообменных процессов, удовлетворительной сходимостью результатов расчета, как с данными собственных экспериментов, так и с данными полученными другими авторами.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена идея использования не одиночных тепловых труб, а составных тепловых труб, что позволяет при уменьшении массы теплоотводящей системы значительно увеличить отводимую тепловую мощность.
2. Разработана математическая модель для численного решения задачи улучшения массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур, отличающаяся от существующих тем, что критериями оптимизации являются уменьшение массы СТТ и температурного запаса электрорадиоизделий относительно максимально допустимой рабочей температуры.
3. Предложен и реализован алгоритм расчета СТТ на основе тактико-технических характеристик модели натурного образца, отличающиеся возможностью на ранних этапах проектирования РЭА рассчитывать интегральные параметры системы, проводить моделирование реакций системы на определяющие конструкторские и режимные параметры с целью оптимизации массогабаритных характеристик и сокращения сроков проектирования. Результаты моделирования соответствуют данным эксперимента.
4. Установлены предельные значения отводимой тепловой мощности к массе СТТ с разными видами теплоносителей 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°C, 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.

Практическая значимость работы определяется тем, что разработанная математическая модель может быть использована при проектировании новых систем теплоотвода бортовой РЭА КА, что подтверждено результатами внедрения в АО «ИСС». Методы и подходы являются новыми в прикладной сфере и могут быть применены в других областях техники и технологии.

По содержанию диссертации можно сформулировать следующие **замечания**:

1. Н.Ю. Соколовым заявлено (стр.6), что основная идея диссертации заключается в разработке методики уменьшения массогабаритных характеристик РЭА. Так же в практической ценности работы (стр. 9) сказано, что разработанная методика может быть использована при проектировании.... Однако в тексте диссертации нет четкого описания предложенной методики.
2. Так же сказано (стр. 7, 8, 9), что разработано программное обеспечение, но в диссертации нет ни информации о регистрации ПО, ни приложения с текстом программы.
3. В тесте работы (стр. 9) сказано, что Научные результаты исследований использованы в учебном процессе для бакалавров и магистров СФУ. Документального подтверждения этого в диссертации нет.
4. Результаты работы представлялись практически только в одном регионе, хотя конференций по направлению диссертационной работы проводятся регулярно по всей стране. Это ограничило всестороннюю апробацию работы научным сообществом.
5. Тексты диссертационной работы и автореферата содержат ряд опечаток, например:

1) на стр. 14 T_p^4 - температура радиационной поверхности, должно быть T_p ;

2) на стр. 14 $[Вт/м^2 K^4]$, должно быть $[Вт/(м^2 K^4)]$;

3) в автореферате на стр. 6.... Материалы диссертации изложены на 150 страницах основного текста, включающего 102 рисунка и 13 таблиц... списка литературы из 98 наименований и списка сокращений.

Должно быть ... Материалы диссертации изложены на 128 страницах основного текста, включающего 48 рисунков и 1 таблицу... списка литературы из 108 наименований и списка сокращений.

Указанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации Н.Ю. Соколова. Текст диссертации написан ясным и грамотным научным языком и сопровождается

качественно оформленным иллюстративным материалом. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Российских конференциях, опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Диссертация Соколова Никиты Юрьевича соответствует специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника, имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области охлаждения радиоэлектронного оборудования космических аппаратов, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация «Улучшение характеристик системы тепловых труб для охлаждения радиоэлектронного оборудования», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор – Соколов Никита Юрьевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.4.6 – теоретическая и прикладная теплотехника».

Официальный оппонент,

руководитель Красноярского филиала

ИТ СО РАН

к.т.н., доцент

22.02.2024 г.



Дектерев

Александр

Анатольевич

630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, дом 1,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики

им С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Тел.: +7 (383) 330-90-40, +7-903-924-92-45

e-mail: dekterev@mail.ru

Подпись Дектерева А.А. заверяю.

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н. Макаров М.С.

