

На правах рукописи



**СОКОЛОВ Никита Юрьевич**

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ТЕПЛОВЫХ  
ТРУБ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**

2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Кулагин Владимир Алексеевич**

Официальные оппоненты: **Кишкин Александр Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»; кафедра холодильной, криогенной техники и кондиционирования, заведующий кафедрой;

**Дектерёв Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, руководитель филиала.

Ведущая организация – Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий».

Защита диссертации состоится 13 марта 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус № 14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан \_\_\_\_ . \_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена быстрым ростом мощности, потребляемой электронными системами, осуществляющими передачу, хранение и обработку информации. Надежное функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) обеспечивается поддержанием теплового режима всех её компонентов. Многообразие конструктивных исполнений РЭА и жесткие условия эксплуатации в конечном итоге практически полностью исчерпали возможности интуитивных методов проектирования охлаждающих систем. В частности, улучшения характеристик систем охлаждения радиоэлектронного оборудования космических аппаратов (КА).

**Степень разработанности темы исследования.** основополагающие исследования в этой области были выполнены М.Н. Ивановским, В.П. Сорокиным, И.В. Ягодкиным, Л.Л. Васильевым и др. В частности, была продемонстрирована математическая модель расчета основных конструктивных параметров цилиндрических тепловых труб (ТТ), а также способы их соединения. В области математического моделирования процессов теплопередачи в Т-образных плоских ТТ (гипертеплопроводящая секция, далее по тексту ГТПС) представляют большой интерес работы В.А. Деревянко и Д.А. Нестерова в ИВМ ФИЦ КНЦ СО РАН. Однако, в условиях повышенных требований к высокой точности определения характеристик ТТ, имеющихся данных оказывается недостаточно, в известных литературных источниках не проведена оценка возможности преобразования одиночной ТТ в систему ТТ.

Для минимизации массоэнергетических параметров системы охлаждения электрорадиоизделий (ЭРИ) целесообразно использовать принцип естественной, нерегулируемой передачи тепловой мощности с более высокого температурного уровня на низкий. Наиболее предпочтительным средством реализации этого принципа являются ТТ, работающие на основе замкнутого испарительно-конденсационного цикла. Они отличаются высокой эффективной теплопроводностью, в десятки раз превышающей теплопроводность металлов.

Однако ТТ классического типа обладают серьезным недостатком, который существенно ограничивает область их применения. Теплопередающая способность ТТ резко уменьшается при неблагоприятных углах наклона в гравитационном поле, когда зона испарения расположена выше зоны конденсатора. Максимальное капиллярное давление, зависит от свойств фитиля и теплоносителя и может быть определено по уравнению Лапласа–Янга, оно уравнивается гидростатическим давлением. Из баланса уравнений можно рассчитать максимальную высоту капиллярного подъема теплоносителя. С другой стороны, имеется сопротивление трения в реальной капиллярной структуре, которое определяется известным уравнением Дарси, где коэффициент проницаемости пропорционален квадрату радиуса пор фитиля.

Решение задачи обеспечения максимальной высоты капиллярного подъема теплоносителя возможно с помощью системы ТТ (СТТ) – последовательного соединения минимум двух ТТ с целью увеличения КПД системы охлаждения. При этом появляется возможность увеличения площади поперечного сечения жидкостных кана-

лов, что приводит к снижению потерь давления, следовательно увеличивается плотность отводимого теплового потока от ЭРИ. В общем случае количество ТТ на разных уровнях СТТ может отличаться, СТТ может иметь прямое соединение ТТ, О-образную и Т-образную схему соединения.

**Соответствие паспорту специальности 2.4.6** – теоретическая и прикладная теплотехника по пунктам направлений исследования: п. 4. Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях ... ; п. 5. Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для ... преобразования, передачи и потребления теплоты; п. 8. Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

**Основная идея** диссертации заключается в разработке методики уменьшения массогабаритных характеристик РЭА на примере РЭА КА, основанной на применении новой математической модели ТТ для описания термодинамических характеристик систем, состоящих из ТТ. Главное ее отличие от существующих в том, что критериями увеличения количества ТТ являются уменьшение массы СТТ и уменьшение температурного запаса ЭРИ относительно максимально допустимой рабочей температуры, позволяющими преобразовать одиночную ТТ в СТТ с увеличением отводимой мощности.

**Цель работы** – улучшение характеристик системы тепловых труб охлаждения радиоэлектронного оборудования.

**Объект исследования** – система тепловых труб.

**Предмет исследования** – теплофизические и массогабаритные характеристики системы ТТ.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценка современного состояния и анализ существующих методов расчета в области конструирования и проектирования ТТ.
2. Математическая постановка и решение задачи улучшения массогабаритных характеристик СТТ на базе цилиндрических ТТ и ГТПС, а также алгоритма и программы их проектного расчета.
3. Проведение испытаний СТТ с целью верификации предлагаемой математической модели и программно-алгоритмического обеспечения.
4. Сравнительный анализ численных и экспериментальных результатов исследований.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования и работы проведены в лабораторных и полунатурных условиях на стендах собственных конструкций с использованием методов тестирования авторской разработки. Обобщены в безразмерном виде и

проанализированы известные результаты исследований различных авторов, которые дополнены собственными экспериментами. Численный анализ проводился с применением программного комплекса ANSYS, использовались методы теории тепломассообменных процессов, математического моделирования, вычислительной математики.

**Достоверность полученных результатов** достигается удовлетворительной сходимостью результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных. Адекватность используемой математической модели подтверждается путем сопоставления результатов расчета в программном комплексе ANSYS, корректным применением методов теории тепломассообменных процессов, математического моделирования, вычислительной математики. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

#### **Научная новизна и положения, выносимые на защиту:**

1. Математически сформулирована и численно решена задача улучшения массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур, отличающаяся от существующих тем, что критериями оптимизации являются уменьшение массы СТТ и температурного запаса ЭРИ относительно максимально допустимой рабочей температуры, позволяющими преобразовать одиночную ТТ в СТТ с увеличением отводимой мощности.

2. Предложены алгоритм и программа расчета СТТ на основе тактико-технических характеристик модели натурального образца, отличающиеся возможностью на ранних этапах проектирования РЭА рассчитывать общеинтегральные параметры системы, проводить моделирование реакций системы на определяющие конструкторские и режимные параметры с целью оптимизации массогабаритных характеристик и сокращения сроков проектирования.

3. 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 °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.

**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 новых инженерно-исследовательских работ, компьютерного моделирования, проектирования, оптимизации и автоматизации оборудования в теоретической и прикладной теплотехнике.

**Практическая ценность работы.** Разработано программное обеспечение, позволяющее провести расчетно-аналитический анализ и максимально достоверно сфор-

мировать на ранних этапах проектирования облик СТТ по массогабаритным и энергетическим характеристикам. Разработанная методика может быть использована при проектировании новых несущих конструкций модулей, например, бортовой РЭА КА. Методы и подходы являются новыми в прикладной сфере и могут быть применены в других областях техники и технологии.

**Результаты диссертации использованы** при проектировании новых несущих конструкций модулей бортовой РЭА КА в АО «Решетнёв». Научные результаты исследований использованы в учебном процессе для бакалавров и магистров по направлениям подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Техносферная безопасность» в дисциплинах «Численные методы моделирования теплотехнологических процессов», «Тепломассообменное оборудование предприятий» (кафедра ТТиГГД СФУ ПИ) в Политехническом институте Сибирского федерального университета, а также в научно-исследовательской деятельности ПИ СФУ.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на: I Всерос. конф. с междунар. участием «Енисейская ТеплоФизика» (Красноярск, 2023); III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Борисовские чтения» (Красноярск, 2021), НПК с междунар. участием «Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики», посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д.т.н., проф. Э.А. Бондарева (Якутск, 2021), VI Всерос. конф. с междунар. участием «Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем» (Красноярск, 2018), Всерос. НТК «Современные проблемы радиоэлектроники» (Железногорск, 2017), IV НТК МС (Железногорск, 2017). V Всерос. конф. «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2015).

**Личный вклад автора** состоит в определении цели и задач исследования, разработке математической модели улучшения массогабаритных характеристик СТТ на базе математических моделей цилиндрических ТТ и ГТПС, создании экспериментальных стендов и проведении экспериментальных работ, создании программно-алгоритмического обеспечения для проектирования бортовой РЭА, формулировании положений, вынесенных на защиту. Постановка задач и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем. В совместных публикациях вклад автора составляет от 50 до 85 %.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них: 8 статей в изданиях из Перечня ВАК, одна – МБД SCOPUS; 8 работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций.

**Объём и структура работы.** Материалы диссертации изложены на 150 страницах основного текста, включающего 102 рисунка и 13 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 98 наименований и списка сокращений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показана практическая значимость полученных результатов, а также их новизна.

**В первом разделе** проведен анализ существующих методов расчета в области конструирования и проектирования ТТ, а также обзор развития в области теплового проектирования несущих конструкций РЭА с интегрированными ТТ.

Последние два десятилетия увеличение мощности и компактности электронных устройств способствовало развитию и активному использованию ТТ для охлаждения электроники. Сейчас ТТ можно встретить повсеместно в системах охлаждения электронных компонентов в персональных компьютерах, ноутбуках, смартфонах и других устройствах. основополагающие исследования в этой области были выполнены: М.Н. Ивановским, В.П. Сорокиным, И.В. Ягодкиным, Л.Л. Васильевым и др. В частности, была продемонстрирована оптимизация параметров ТТ, а также способы их соединения. Проведенное Л.Л. Васильевым комплексное экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена в миниатюрных ТТ плоской и цилиндрической формы, изготовленных из меди, с водой в качестве теплоносителя, с тремя типами капиллярных структур (порошковой, сеточной и образованной пучком тонких проволок) определяет максимально отводимую мощность  $\approx 20$  Вт для миниатюрной ТТ длиной 0,2 м и внешним диаметром 4 мм для вертикальной ориентации (нагреватель над термостабилизированной поверхностью), длина зон испарения и конденсации соответственно 0,07 м и 0,085 м (эффективная длина теплопередачи составляет 0,115 м). Отношение отводимой тепловой мощности к массе для медно-водяной миниатюрной ТТ не приведено, но приведена толщина пористой структуры  $1 \cdot 10^{-3}$  м, что позволяет оценить минимальную массу ТТ, при толщине стенки  $3 \cdot 10^{-4}$  м расчетная масса составит 22 г. Расчетное соотношение отводимой тепловой мощности к массе для медно-водяной миниатюрной ТТ ориентировочно составит 900 Вт/кг на расстоянии 0,115 м от термостабилизированной поверхности с температурой 30 °С. Отношение отводимой тепловой мощности к массе для медно-водяной ГТПС составляет 220 Вт/кг при вертикальной ориентации на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности с температурой 25 °С. В области математического моделирования процессов теплопередачи ТТ представляют большой интерес работы В.А. Дервянко и Д.А. Нестерова в ИВМ ФИЦ КНЦ СО РАН.

Для решения задачи оптимизации системы охлаждения необходимо использовать корректную математическую модель, учитывающую все значимые особенности, и алгоритмы, позволяющие на основе математической модели получить эффективное решение. Кроме того, на сегодняшний день требуемый срок изготовления и проектирования КА не должен превышать 2,5 года. В связи с этим существует необходимость сокращения сроков разработки бортовой РЭА КА за счет возможности на ранних этапах проектирования оценки влияния режимных, геометрических и теплофизических параметров на характеристики системы охлаждения и выбора ее оптимального варианта.

Увеличение количества ТТ приводит к уменьшению длины ТТ, что позволяет увеличить площадь поперечного сечения каналов фитиля или применить составной фитиль из продольных канавок, закрытых микропористым металлом. Варьируемыми параметрами СТТ являются: количество ТТ, соотношение длин ТТ, разница температур в зоне соединения ТТ, площадь поперечного сечения каналов фитиля, соотношение длины и ширины в поперечном сечении каналов фитиля, выбор способа соединения ТТ (встык или внахлест).

Таким образом, результаты анализа обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки решаемых в диссертации задач.

**Второй раздел** посвящен развитию математического моделирования в данной области знаний и созданию новой математической модели оптимизации массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур на базе математической модели цилиндрических ТТ и ГТПС.

Необходимо, чтобы максимальный капиллярный напор фитиля  $\Delta P_c$  превышал полное падение давления в ТТ:

$$\Delta P_c \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g, \quad (1)$$

где  $\Delta P_c$  – максимальный капиллярный напор фитиля;  $\Delta P_l, \Delta P_v$  – падение давления в жидкостных и паровых каналах ТТ;  $\Delta P_g$  – падение давления при вертикальной ориентации (в поле действия гравитационных сил). Тогда математическая модель улучшения массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур на базе математической модели цилиндрических ТТ будет иметь вид:

$$l_0 = \sum l_{h_{ij}} + \sum l_{g_{ij}}; \quad l_i = l_{ij} = \frac{\sum l_{g_{ij}} - \Delta l_i}{i} + \Delta l_i; \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad \Delta l_1 = 0;$$

$$l_{eff_{ij}} = \sum l_{h_{ij}} + l_i - \frac{(l_{c_{ij}} + l_{e_{ij}})}{2} \quad (3)$$

$$l_{e_{ij}} = \begin{bmatrix} l_{e_{11}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{e_{n1}} & \dots & l_{e_{nm}} \end{bmatrix}; \quad l_{c_{ij}} = \begin{bmatrix} l_{c_{11}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{c_{n1}} & \dots & l_{c_{nm}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$l_{e_{11}} = l_{e_{21}} = l_{e_{n1}} = const;$$

$$l_{c_{11}} = l_{c_{22}} = l_{e_{nm}} = const, \quad n = m; \quad (5)$$

$$l_{e_{nm}} = l_{c_{nm-1}} = \Delta l_n, \quad n \geq 2, m \geq 2$$

$$r_{c_{ij}} = \frac{a_{ij} + b_{ij}}{\pi} \quad (6)$$



$$\Delta P_{lij} = \left( \frac{4 \cdot \mu_{lij} \cdot l_{effij} \cdot Q}{\rho_{lij} \cdot L \cdot a_{ij}^2 \cdot b_{ij}^2 \cdot F_c} \right) \cdot \frac{1}{N} = \frac{G}{N} \quad (7)$$

$$\Delta P_{cij} = \frac{2 \cdot \sigma_{ij} \cdot \cos \theta}{r_{cij}} \quad (8)$$

$$\Delta P_{gij} = \rho_{lij} \cdot g \cdot l_i \cdot \sin \varphi_{ij} \quad (9)$$

$$N = \frac{G}{\Delta P_{cij} - \Delta P_{gij}} \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{fij} = \frac{N \cdot a_{ij} \cdot 1,2}{2 \cdot \pi} \quad (11)$$

$$S_{vij} = \frac{Q}{\rho_{vij} \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_0}{2(\gamma + 1)M}}} \quad (12)$$

$$S_{fij} = \pi \cdot (\tilde{r}_{fij} + b_{ij})^2 - \pi \cdot \tilde{r}_{fij}^2 \quad (13)$$

$$S_{fporij} = \pi \cdot \tilde{r}_{fij}^2 - \pi \cdot (\tilde{r}_{fij} - h_{e11})^2 \quad (14)$$

$$S_{meij} = 4 \cdot h_{me} \cdot \left( \sqrt{S_{vij} + S_{fij} + S_{fporij}} \right) + 4 \cdot h_{me}^2 \quad (15)$$

$$S_{buttij} = S_{vij} + 4 \cdot d \cdot \sqrt{S_{vij}} \quad (16)$$

$$S_{e11} = 4 \cdot l_{e11} \cdot \sqrt{S_{vij}}; \quad S_{c11} = 4 \cdot l_{c11} \cdot \sqrt{S_{vij}} \quad (17)$$

$$m_i = \sum_j m_{ij} = \sum_j (\rho_{meij} \cdot S_{meij} + \rho_{fij} \cdot S_{fij} + \rho_{porij} \cdot S_{fporij}) \cdot l_{ij} \quad (18)$$

$$R_i = \sum_j (R_{buttij} + R_{e11} + R_{c11}) = \frac{2 \cdot (i-1) \cdot h_{e11}}{\lambda_f \cdot S_{buttij}} + \frac{h_{e11}}{\lambda_f \cdot S_{e11}} + \frac{h_{c11}}{\lambda_f \cdot S_{c11}} \quad (19)$$

$$T_{max} < T = T_{STR} + \Delta T \cdot (i-1) + Q \cdot R_i \quad (20)$$

$$\begin{cases} \frac{Q}{S_{buttij}} < Q_{spec}, \Delta l_i = 0; \Delta T = 0 \\ \frac{Q}{S_{buttij}} > Q_{spec}, \Delta l_i = \Delta l_{ij} = \frac{Q \cdot h_{e11}}{2 \cdot \Delta T \cdot \lambda_f \cdot \sqrt{S_{vij}}}; R_{buttij} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$m_{i+1} < m_i \quad (22)$$

где  $i$  – количество ТТ;  $j$  – нумерация ТТ в СТТ;  $Q$  – тепловыделение ЭРИ;  $l_0$  – длина ТТ;  $\Delta l_i$  – длина зоны соединения ТТ;  $\sum l_{hij}$  – длина всех горизонтальных участков ТТ;  $\sum l_{gij}$  – длина всех вертикальных участков ТТ;  $l_{eff\ ij}$  – эффективная длина ТТ (перемещение теплоносителя);  $l_{cij}$  – длина зоны конденсации ТТ в СТТ;  $l_{eij}$  – длина зоны испарения ТТ в СТТ;  $l_{a_{ij}}$  – длина адиабатической зоны ТТ в СТТ;  $r_{cij}$  – эквивалентный радиус канавки в фитиле;  $a_{ij}$  – ширина канавки ТТ;  $b_{ij}$  – глубина канавки ТТ;  $\mu_{lij}$  – динамическая вязкость теплоносителя (в жидкой фазе);  $\rho_{lij}$  – плотность теплоносителя (в жидкой фазе);  $L$  – скрытая теплота парообразования;  $F_c$  – поправочный коэффициент на отношение сторон прямоугольной канавки (артерии);  $\sigma_{ij}$  – поверхностное натяжение;  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $\varphi_{ij}$  – угол наклона ТТ (к горизонту);  $N$  – количество канавок;  $\tilde{r}_{fij}$  – эквивалентный радиус канавчатого фитиля;  $\rho_{vij}$  – плотность паров теплоносителя;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $R$  – газовая постоянная;  $T_0$  – наименьшая рабочая температура ТТ;  $M$  – молекулярный вес теплоносителя;  $m_i$  – масса ТТ;  $\rho_{me\ ij}$  – плотность металла;  $\rho_{f\ ij}$  – плотность канавчатого фитиля;  $\rho_{por\ ij}$  – плотность пористого фитиля;  $h_{e\ 11}, h_{c\ 11}$  – толщина пористого фитиля в зоне испарения и конденсации;  $\lambda_f$  – теплопроводность фитиля;  $T_{max}$  – максимальная рабочая температура ЭРИ;  $T$  – расчетная температура;  $T_{STR}$  – температура термостабилизированной поверхности (температура зоны конденсации).

*Численный расчет* массогабаритных характеристик СТТ на базе цилиндрических медно-водяных ТТ выполнен для одиночного нагревателя площадью  $4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> с тепловыделением 20 Вт, 30 Вт расположенного на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности с температурой 5 °С. Задача, встречающаяся в модулях РЭА КА, схематично изображена на рисунке 1.

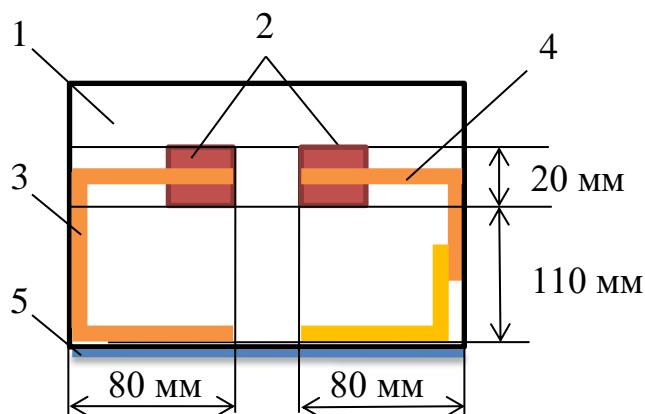


Рисунок 1 – Схема вычислительного эксперимента (цилиндрические ТТ):  
 1 – несущая конструкция РЭА, 2 – нагреватель (ЭРИ), 3 – цилиндрическая ТТ,  
 4 – СТТ на базе цилиндрических ТТ, 5 – термостабилизированная поверхность

Системы охлаждения построены на базе одиночной ТТ и двухуровневой СТТ. Обе системы охлаждения имеют С-образную геометрию, которая условно может быть разделена на три части, две горизонтальных части длиной 0,08 м и вертикальная часть длиной 0,12 м. Согласно математической модели (2)–(22) вертикальная часть одиночной ТТ будет разделена на несколько частей (преобразовано в двухуровневую СТТ) при выполнении условия уменьшения массы СТТ.

Результаты расчета, представленные на рисунке 2, показывают, что отведение 30 Вт обеспечивается одиночной ТТ с массой 74 г. Минимальная масса одиночной ТТ обеспечивается при площади поперечного сечения каждой артерии  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  (150 x 100 мкм). Масса двухуровневой СТТ зависит от заданной разницы температуры в месте соединения ТТ. Отведение 30 Вт обеспечивается СТТ с массой 44 г при разнице температур в зоне соединения 2 °С. Минимальная масса СТТ (перегрев 2 °С) обеспечивается в широком диапазоне поперечного сечения артерий от  $1,5 \cdot 10^{-8}$  до  $4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

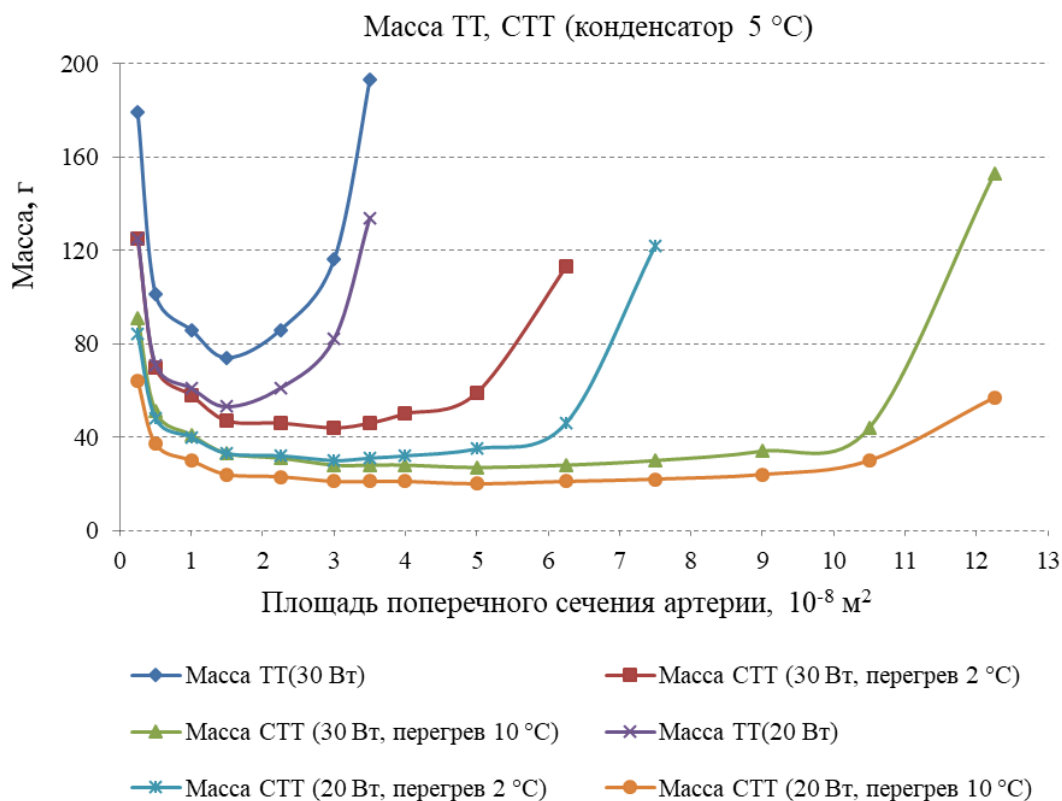


Рисунок 2 – Зависимость массы ТТ и СТТ от площади поперечного сечения жидкостной артерии при фиксированной мощности нагревателя

Отведение 30 Вт обеспечивается двухуровневой СТТ с массой 28 г при разнице температур в зоне соединения 10 °С. Минимальная масса СТТ обеспечивается в широком диапазоне площади поперечного сечения артерий от  $1,5 \cdot 10^{-8}$  до  $10,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

*Математическая модель* улучшения массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур на базе математической модели ГТПС.

Система уравнений имеет вид:

$$\operatorname{div}(-d \cdot \lambda \cdot \nabla T(x, y)) + g(x, y)T(x, y) + q_{ev}(x, y) = f(x, y), \quad (23)$$

$$\operatorname{div}\left(d_{hp} \frac{\rho_v}{\mu_v} K_v \nabla P_v\right) = -\frac{q_{ev}}{H_{ev}}, \quad (24)$$

$$\operatorname{div}\left(d_{hp} \frac{\rho_l}{\mu_l} K_l \nabla P_l\right) = \frac{q_{ev}}{H_{ev}}, \quad (25)$$

где  $T(x, y)$  – распределение температуры;  $(d \cdot \lambda)$  – произведение толщины и эффективной теплопроводности конструкции ТТ (при отсутствии циркуляции теплоносителя);  $g(x, y)$  и  $f(x, y)$  – коэффициенты, учитывающие внешние потоки тепла (тепловыделение ЭРИ, сток тепла, слагаемые для радиационных потоков тепла и пр.);  $q_{ev}(x, y)$  – поглощаемое испаряющимся теплоносителем в ТТ тепло ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $P_l(x, y)$  и  $P_v(x, y)$  – давления в жидкостной и паровой фазах теплоносителя;  $H_{ev}$  – скрытая теплота парообразования теплоносителя;  $\mu$  и  $\rho$  – вязкость и плотность фаз теплоносителя;  $K_l, K_v$  – коэффициенты (в общем случае тензоры), определяющие проницаемость капиллярной структуры ТТ для жидкости и пара.

Для решения системы (23)–(25) дополнительно используется соотношение  $\nabla P_v = \frac{\partial P_v}{\partial T_v} \nabla T_v$ , указывающее, что пар внутри ТТ находится на линии насыщения. При этом зависимость производной давления насыщенного пара по температуре может задаваться как отдельная характеристика теплоносителя. Система решается итерационно, при этом на каждой итерации после расчета распределения давлений жидкости и пара проверяется следующее условие:

$$P_v(x, y) - P_l(x, y) < P_c, \quad P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c} \quad (26)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\theta$  – предельный угол смачивания материала фитиля теплоносителем.

В области, где условие (26) не выполняется, фитиль осушается, и поглощение тепла при испарении прекращается. Величина  $q$  в этой области принимается равной нулю для последующих итераций. Аналогично учитывается условие на замерзание теплоносителя:  $T(x, y) > T_0$ , где  $T_0$  – температура замерзания.

В случае преобразования ГТПС в СТТ при соединении встык (металлическое соединение) необходимо зону соединения описать двумерным стационарным уравнением теплопроводности, учитывающим сток тепла:

$$\operatorname{div}(-\lambda(x, y) \cdot d(x, y) \cdot \nabla T(x, y)) + \alpha_c \cdot (T(x, y) - T_c(x, y)) = q(x, y) \quad (27)$$

где  $T(x, y)$  – распределение температуры поверхности модуля,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала модуля,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ,  $d$  – толщина материала модуля, м,  $q(x, y)$  – распределение плотности теплового потока на поверхность модуля без учета

потока к области отвода тепла,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ,  $T_c(x, y)$  – распределение температуры стока тепла,  $\alpha_c$  – коэффициент теплопередачи между теплоотводящей поверхностью и поверхностью модуля,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Величина  $\alpha_c$  имеет ненулевое значение только в области стока тепла.

*Численный расчет* оптимизации массогабаритных характеристик СТТ на базе медной ГТПС выполнен для одиночного нагревателя площадью  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  в области  $10^{-2} \text{ м}^2$  на максимальном расстоянии от термостабилизированной поверхности (рисунок 3) во всем диапазоне рабочих температур РЭА. Толщина ГТПС составляет  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , толщина фольги  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Зона соединения СТТ имеет толщину  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , теплопроводность  $120 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ . Эксперименты проведены для вертикальной ориентации ГТПС в поле действия гравитационных сил. Площадь соединения конденсатора ГТПС с термостабилизированной поверхностью составляет  $S_{\text{кон}} \approx 10^{-3} \text{ м}^2$ . Рассчитано увеличение отводимой тепловой мощности после преобразования ГТПС в СТТ, эффект зависит от соотношения длин ТТ. Необходимо оптимизировать соотношение длин в СТТ, чтобы получить максимальную пользу. Для удобства необходимо ввести величину  $\gamma = L1/(L1 + L2)$ , где  $L1$  – длина первой ТТ,  $L2$  – длина второй ТТ (если  $\gamma = 0.5$ , то длины одинаковые).

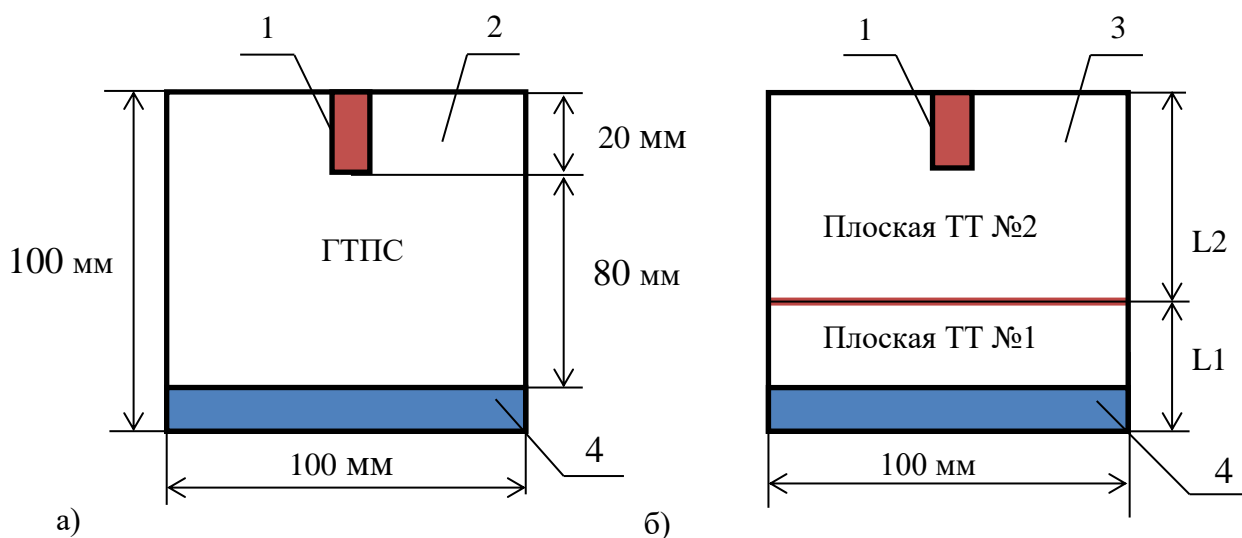
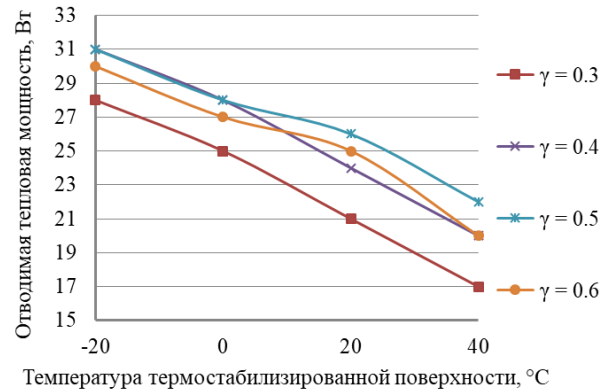
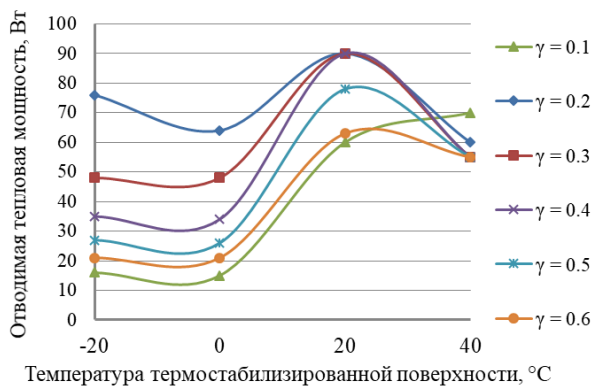


Рисунок 3 – Схема вычислительного эксперимента: а) – ГТПС; б) – СТТ (2 ст.):  
1 – нагреватель, 2 – одиночная ГТПС, 3 – СТТ на базе ГТПС, 4 – конденсатор

Результаты решения математической модели (23)–(27) для задачи отведения теплового потока от одиночного нагревателя представлены на рисунках 4–5. Методом простого перебора с шагом в  $10^{-2} \text{ м}$  рассчитано оптимальное соотношение длин уровней для СТТ (вода) составляет  $\gamma = 0,2 \div 0,3$ , для СТТ (ацетон) составляет  $\gamma = 0,5$ .



а) б)  
Рисунок 4 – Определение  $\gamma$  двухуровневой СТТ: а) вода, б) ацетон

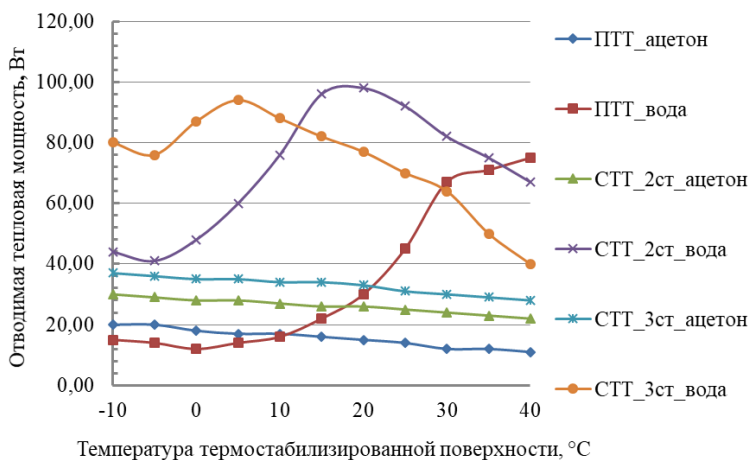


Рисунок 5 – Зависимость отводимой тепловой мощности нагревателя от температуры термостабилизированной поверхности для двухуровневой и трехуровневой СТТ

Результаты сравнительного анализа характеристик ГТПС и двухуровневой СТТ на модельной задаче с одним источником тепла показывают преимущества СТТ по сравнению с одиночной ГТПС. На рисунке б показаны зависимости температуры ЭРИ от их тепловыделения  $T(Q)$  для ГТПС, двухуровневой и трехуровневой СТТ, для разных температур термостабилизированной поверхности. Для одиночной ГТПС с водой в качестве теплоносителя в диапазоне температур от 10 °C до 40 °C наблюдается резкий рост отводимой мощности, в диапазоне температур от минус 10 °C до 10 °C перенос тепла обеспечивается преимущественно за счет теплопроводности корпуса. Значение мощности начала осушения фитиля сильно зависит от температуры конденсатора. Это объясняется зависимостью характеристик воды (в основном водяного пара) от температуры. Плотность пара резко возрастает с ростом температуры. Анализ результатов показывает, что наиболее эффективным техническим решением во всем диапазоне рабочих температур является двухуровневая СТТ с водой в качестве теплоносителя, поскольку при 40 °C у нагревателя имеется достаточный запас по температуре относительно трехуровневой СТТ. Двухуровневая СТТ (вода) обеспечивает увеличение отводимой тепловой мощности на 60 % относительно ГТПС без изменения площади нагревателя.

*Численный расчет* оптимизации массогабаритных характеристик СТТ на базе двух титановых ГТПС соединенных последовательно. По результатам натурных экспериментов с одиночными титановыми ГТПС в математической модели ГТПС (23)–(26) заданы коэффициенты проницаемости капиллярной структуры. Две титановые ГТПС с ацетоном в качестве теплоносителя соединены последовательно через переходную медную пластину, теплопередача обеспечивается теплопроводящей пастой с теплопроводностью  $\lambda = 1,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , всего 4 слоя пасты. Толщина пасты: между ГТПС и переходной пластиной составляет  $\delta_1 \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ; между ГТПС и нагревателем составляет  $\delta_2 \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ; между ГТПС и термостабилизированной поверхностью составляет  $\delta_3 \approx 0,5 \text{ мм}$ .

Площадь соединения (рисунок 7) ГТПС составляет  $S \approx 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Толщина ГТПС составляет  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Одиночный нагреватель площадью  $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  расположен вертикально, нижняя граница находится на расстоянии  $0,065 \text{ м}$  от термостабилизированной поверхности с температурой  $25 \text{ °C}$ . Расчеты проведены для вертикальной ориентации ГТПС в поле действия гравитационных сил. Расчет произведен последовательно для каждой ГТПС, при этом переходная пластина реализована в расчете как граничное условие: температура нагревателя № 1 равна температуре конденсатора № 2. Термостабилизированная поверхность расположена в нижней части ГТПС (конденсатор № 1), площадь  $S \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Рассчитано максимальное значение отводимой тепловой мощности СТТ, при условии, что температура нагревателя № 2 не должна превышать  $80 \text{ °C}$ .

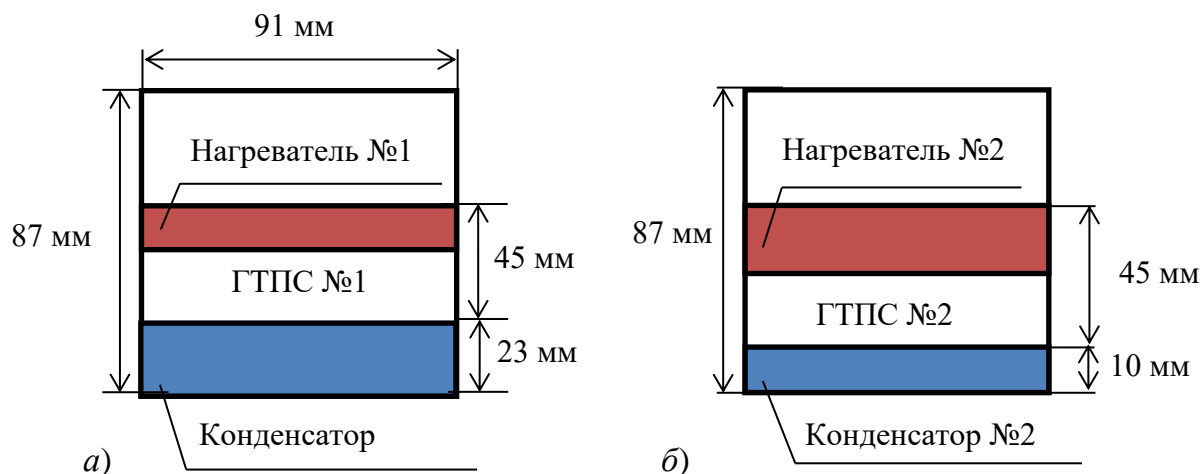


Рисунок 7 – Схема численного расчета: а) ГТПС №1; б) ГТПС № 2

Результаты расчета представлены на рисунке 8. Контрольные точки: 1 – термостаб. поверхность; 2 – низ адиаб. зоны ГТПС № 1; 3 – верх адиаб. зоны ГТПС №1; 4 – низ адиаб. зоны ГТПС № 2; 5 – верх адиаб. зоны ГТПС №1; 6 – нагреватель. Результаты расчетов показывают, что СТТ (две ГТПС) обеспечивают отведение  $60 \text{ Вт}$ , при этом температура нагревателя не превышает  $67 \text{ °C}$ . Капиллярная нагрузка распределена равномерно по обеим ГТПС (рисунок 9), при тепловой мощности  $60 \text{ Вт}$  осушения нет во всем внутреннем объеме ГТПС. При тепловой мощности  $70 \text{ Вт}$  обе ГТПС ча-

стично осушаются, вследствие чего температура нагревателя №2 увеличилась до 110°C и превысила максимально допустимую рабочую температуру нагревателя.

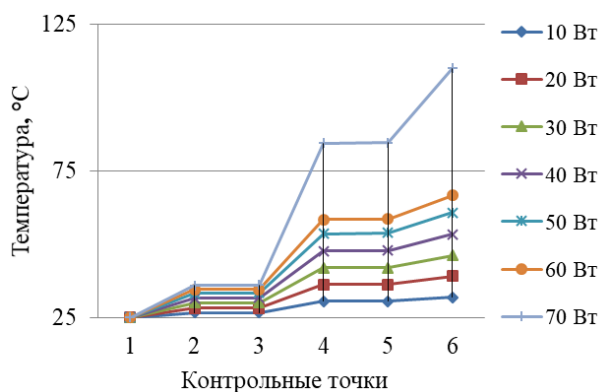


Рисунок 8 – Зависимость  $T(Q)$  для СТТ (две ГТПС)

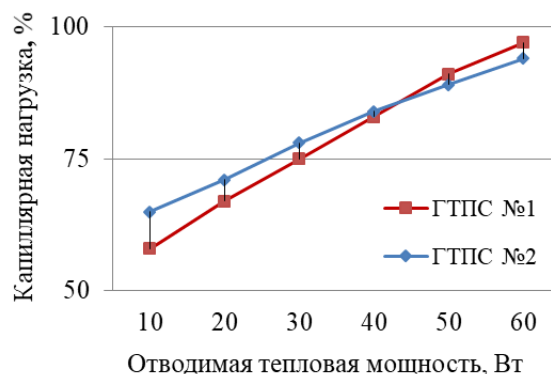


Рисунок 9 – Зависимость капиллярной нагрузки для СТТ (на базе двух ГТПС)

Результаты численного расчета оптимизации массогабаритных характеристик СТТ с использованием пакета прикладных программ ANSYS на базе цилиндрических медно-водяных ТТ согласно математической модели (2)–(22) могут быть использованы в современных системах инженерного анализа. На этом этапе необходимо создать точную геометрическую модель СТТ (цифровой двойник) по результатам численного расчета математической модели (2)–(22) и интегрировать СТТ в модуль РЭА средствами программных продуктов. Следует задать теплопроводность для всех деталей РЭА. Медно-водяная ТТ в ANSYS упрощена до трех деталей: металлический корпус с теплопроводностью 380 Вт/(м·°C); фитиль с теплопроводностью 10 Вт/(м·°C); газовый канал с теплопроводностью материала № 1 согласно рисунку 10.

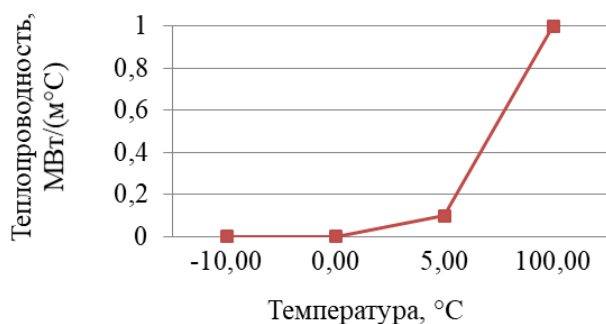


Рисунок 10 – Зависимость  $\lambda(T)$  для материала № 1

Нагреватель площадью  $4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> с тепловыделением 35 Вт расположен на расстоянии 0,11 м от термостабилизированной поверхности. Расчет выполнен для термостабилизированной поверхности с температурой 40 °C и минус 5 °C.

Площадь поперечного сечения газового канала составляет  $\approx 7,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. В адиабатической зоне ТТ тепловой поток распределен равномерно по поперечной площади сечения газового канала ТТ. Согласно расчету, тепловой поток на ровных участках адиабатической зоны составляет 4,75 МВт/м<sup>2</sup> (4,75 Вт/мм<sup>2</sup>),

т.е. тепловая мощность полностью передается по газовому каналу вследствие его высокой теплопроводности. Объединяя результаты расчетов математической модели (2) – (22) и ANSYS Workbench возможно контролировать характеристики ТТ в РЭА со сложной геометрией и многочисленными нагревателями, распределенными по корпусу РЭА.



В третьем разделе приведена методика проведения экспериментальных работ. Разработанные 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. Общая схема эксперимента по исследованию характеристик СТТ состоящей из цилиндрических ТТ показана на рисунке 11.

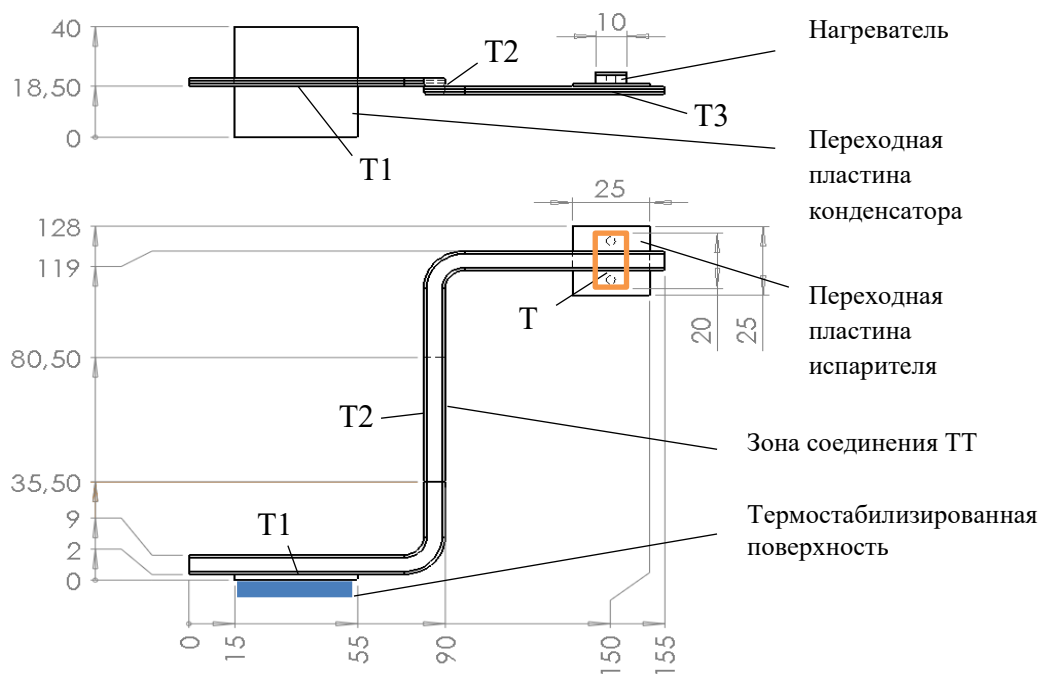


Рисунок 11 – Схема расположения нагревателя, испарителя и конденсатора в СТТ на базе цилиндрических ТТ

СТТ располагалась вертикально, снаружи обклеена несколькими слоями теплоизолирующего материала (вспененный полиэтилен) с теплопроводностью  $0,037 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  суммарной толщиной  $0,03 \text{ м}$ . Медная переходная пластина конденсатора прижималась к термостабилизированной поверхности через слой теплопроводящей пасты. В данной работе использовалась теплопроводящая паста с теплопроводностью  $\lambda = 1,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  и толщиной слоя  $\delta \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Термостат обеспечивал постоянство температуры на переходной пластине конденсатора СТТ. В экспериментах в качестве нагревателя использовался резистор P1-17 РКМУ.434110.001 ТУ. Все соединения в СТТ выполнены припоем ПОС61 ГОСТ 21930. Теплопроводность припоя ПОС61 составляет  $60 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Система сбора данных построена на базе прибора ТРМ138 ТУ 4217-015-46526536-2008, термопары ТХК 9419 ТУ 4211-088-02566540-2010 подключены к прибору ТРМ138. 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. Для каждого значения мощности после достижения стационарного со-

стояния фиксировались температуры: конденсатор – Т1; зона соединения ТТ – Т2; испаритель – Т3. Температура нагревателя не должна превышать 80 °С.

Общая схема эксперимента по исследованию характеристик ГТПС и СТТ (на базе двух ГТПС) показана на рисунке 12. ГТПС располагались вертикально, теплоизоляция отсутствовала, температура окружающего воздуха составляла 22 °С. Термограммы сняты тепловизором инфракрасным FLIR Р660. В зонах контроля температуры (КТ1–КТ7) была наклеена лента ПВХ синяя ГОСТ 16214 со степенью черноты – 0,92.

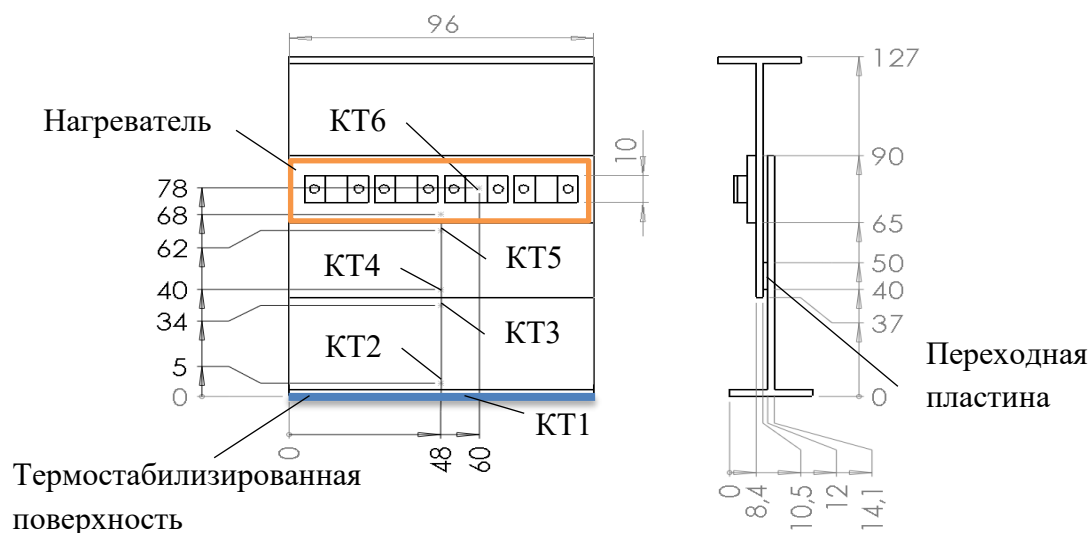


Рисунок 12 – Схема расположения ГТПС в СТТ

Переходная пластина (медная) прижималась к поверхностям ГТПС через слой теплопроводящей пасты. В данной работе использовалась теплопроводящая паста с теплопроводностью  $\lambda = 1.8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ . Толщина каждого слоя пасты между ГТПС и переходной пластиной  $\delta_1 \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Толщина слоя пасты: между ГТПС и нагревателем составляет  $\delta_2 \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ; между ГТПС и термостабилизированной поверхностью составляет  $\delta_3 \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

Устройство охлаждения обеспечивало постоянство температуры на термостабилизированной поверхности, измерения проведены при 25 °С. В ходе каждого эксперимента мощность тепловыделения нагревателя увеличивалась ступенчато. Для каждого значения мощности после достижения стационарного состояния фиксировались температуры.

Предел основной приведенной погрешности измерения при использовании термопар у прибора ТРМ138 составляет 0,5 %. Измерение температур обеспечивалось термопарами L-типа, которые обеспечивали погрешность измерения разности температур – менее 0,5 °С за счет предварительной калибровки. Калибровка ТРМ138 проведена при температурах: минус 5 °С и 40 °С, отличие показаний термопар, соединенных рабочими концами в одну точку, составляет не более 0,2 °С. Погрешность измерения электрического напряжения и тока на нагревателях была в пределах  $\delta I = 0,5 \%$  и  $\delta U = 1,5 \%$  соответственно. Стандартный метод анализа позволяет оценить погрешность измерения мощности тепловыделения нагревателей в пределах

$\delta Q = (\delta I^2 + \delta U^2)^{0.5} = 1,6 \%$ . Тепловизор инфракрасный FLIR P660 обеспечивает погрешность измерения температуры  $\pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $\pm 2 \%$  от показания в диапазоне измерений от минус  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , температурная чувствительность (между пикселями ИК-матрицы)  $< 30 \text{ мК}$ . С учетом неравномерности распределения температуры на нагревателе, суммарная потеря тепловой мощности составила не более  $10 \text{ Вт}$ .

**В четвертом разделе** рассмотрены результаты экспериментальных исследований СТТ. СТТ на базе двух цилиндрических ТТ обеспечивает стабильную теплопередачу в диапазоне температур от минус  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре термостабилизированной поверхности минус  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  резкое увеличение температуры нагревателя (осушение фитиля) возникает при тепловой мощности свыше  $20 \text{ Вт}$ . При температурах от минус  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  и тепловой мощности  $20 \text{ Вт}$  температура нагревателя составляет  $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . При  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается линейный рост температур на обеих ТТ до  $35 \text{ Вт}$ .

Масса цилиндрической ТТ составляет  $13 \text{ г}$ , соответственно  $26 \text{ г}$  масса СТТ. По результатам эксперимента СТТ при температуре основания минус  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  обеспечивает отвод тепловой мощности не более  $20 \text{ Вт}$ , при температуре основания  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  обеспечивает отвод тепловой мощности не более  $35 \text{ Вт}$ . Согласно численному расчету СТТ (рисунок 2) этой мощности и перегреву в зоне соединения соответствует масса  $30 \text{ г}$ . СТТ на базе медно-водяных цилиндрических ТТ имеет предельное значение удельной тепловой нагрузки  $667 \text{ Вт/кг}$  при вертикальной ориентации (нагреватель над термостабилизированной поверхностью) на расстоянии  $0,11 \text{ м}$  при температуре термостабилизированной поверхности минус  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1167 \text{ Вт/кг}$  при температуре термостабилизированной поверхности  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Поскольку титановая ГТПС заправлена ацетоном в рабочем диапазоне температур РЭА она не замерзает. Поэтому измерения проведены только при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . На титановой ГТПС при тепловой мощности  $22 \text{ Вт}$  произошло резкое увеличение температуры нагревателя свыше  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , что сопоставимо с результатами численного эксперимента. На СТТ температура не имела резких скачков (не достигла капиллярного ограничения), температура нагревателя плавно увеличивалась до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  при тепловой мощности  $60 \text{ Вт}$ . Конвективные и ИК потери составили не более  $10 \text{ Вт}$ .

Масса одиночной титановой ГТПС составляет  $42 \text{ г}$ , соответственно масса СТТ на базе двух ГТПС –  $84 \text{ г}$ . СТТ на базе титановых ГТПС имеет предельное значение удельной тепловой нагрузки  $690 \text{ Вт/кг}$  при вертикальной ориентации на расстоянии  $0,065 \text{ м}$  от термостабилизированной поверхности с температурой  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Одиночная титановая ГТПС отводит  $430 \text{ Вт/кг}$  при вертикальной ориентации на расстоянии  $0,065 \text{ м}$  от термостабилизированной поверхности с температурой  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Результаты численных и натуральных экспериментов показывают увеличение отводимой тепловой мощности от нагревателя в результате преобразования одиночных ТТ в двухуровневую СТТ во всем диапазоне рабочих температур РЭА. Поскольку зависимость отводимой тепловой мощности обратно пропорциональна длине цилиндрических ТТ и нелинейным образом проявляется в ГТПС с миниатюрным нагревателем (относительно поверхности ГТПС), СТТ на базе медно-водяных цилиндрических ТТ с составным артериальным фитилем, описанная математической моделью (2)–(22) является техниче-

ским решением в 4–8 раз (в зависимости от температуры термостабилизированной поверхности) превосходящим по эффективности титановую ГТПС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Математически сформулирована и численно решена задача оптимизации массогабаритных характеристик СТТ во всем диапазоне рабочих температур на базе математических моделей цилиндрических ТТ и ГТПС, отличающаяся от существующих тем, что критериями оптимизации являются уменьшение массы СТТ и температурного запаса ЭРИ относительно максимально допустимой рабочей температуры, позволяющими преобразовать одиночную ТТ в СТТ с увеличением отводимой мощности.

2. Предложены алгоритм и программа расчета СТТ на основе модели натурального образца по его тактико-техническим характеристикам, отличающиеся тем, что они позволяют на ранних этапах проектирования бортовой РЭА рассчитывать обще интегральные параметры системы, проводить моделирование реакций системы на определяющие конструкторские и режимные параметры с целью улучшения массогабаритных характеристик и сокращения сроков проектирования бортовой РЭА КА.

3. 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.

## СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, из Перечня ВАК:*

1. **Соколов Н.Ю.**, Кулагин В.А. Численное и физическое моделирование работы системы тепловых труб для отвода тепла от радиоэлектронного оборудования различного назначения. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2022. № 4(28), 50–69; DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.004;

2. **Соколов Н.Ю.**, Кулагин В.А. Нестеров Д.А. Система тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космического аппарата. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2021, 14(4). 363–377. DOI: 10.17516/1999-494X-0317 (**K1**, WoS RSCI, IF 0,508);

3. **Соколов Н.Ю.**, Кулагин В.А., Нестеров Д.А. Математическое моделирование и оптимизация систем тепловых труб, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2021, 14(7). 860–879. DOI: 10.17516/1999-494X-0352 (**K1**, WoS RSCI, IF 0,508);

4. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Улучшение теплофизических характеристик тепловых труб. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2017, 10(3), 372–376. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-372-376. (WoS RSCI, IF 0,537);

5. Сунцов С.Б., Нестеров Д.А., **Соколов Н.Ю.** Эффективность использования гипертеплопроводящих секций на космических аппаратах информационного обеспечения. *Наукоемкие технологии*, 2017. Т. 18(12). 54–58.

6. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Разработка оборудования для тестирования тепловых труб. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2015, 8(6), 774–786; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-774-785. (WoS RSCI, IF 0,657);

7. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Численное исследование характеристик тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2015, 8(6), 769–773; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-6-769-773. (WoS RSCI, IF 0,657);

8. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Кавитация в элементах запорной арматуры трубопроводных систем. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2014, 7(7), 872–880; (WoS RSCI, IF 0,327);

**в международных базах Scopus и Web of Science:**

9. Vladimir Kulagin and **Nikita Sokolov** Improvement of Heat Pipe Systems for Cooling Electronic Equipment. *AIP Conference Proceedings* **2528**, 020022. (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0107183>; (SCOPUS Q4. IF 0.402,);

**в других изданиях:**

10. **Соколов Н.Ю.**, Кулагин В.А. Методика параметрической оптимизации модуля бортовой радиоэлектронной аппаратуры с интегрированной гипертеплопроводящей секцией, *Енисейская ТеплоФизика: тезисы докладов I Всерос. конф. с междунар. участием*. Красноярск: СФУ, 2023. С. 143–144.

11. Kulagin V.A., **Sokolov N. Yu.**, Nesterov D.A. Optimization of the thermal regime of satellite radioelectronic equipment. *Борисовские чтения: матер. III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / отв. за вып. Е.С. Воеводин. – Электрон. дан. (73 Мб)*. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021. – Электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: PC не ниже класса Pentium I; 128 Mb Ram; Windows 98/XP/7; Adobe Reader v 8.0 и выше. – Загл. с экрана. ISBN 978-5-7638-4565-5; С. 395–402;

12. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Совершенствование систем тепловых труб для охлаждения электронной аппаратуры. *Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики: Матер. НПК с междунар. участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д.т.н., проф. Э.А. Бондарева*. (Якутск, 12–17 июля 2021). Киров, 2021. С. 235–237;

13. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Физико-математическое моделирование предельных характеристик системы тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов. *Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: Материалы и доклады VI Всерос. конф.* (Красноярск, 18–21 сент. 2018 г.), Красноярск: СФУ, 2018. С. 205–210;

14. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Совершенствование оборудования для проверки Т-образных плоских тепловых труб. *Безопасность и живучесть технических систем: материалы и доклады V Всероссийской конференции: в 3 т.* (Красноярск, 12–16 октября 2015 года). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. Т. 2. С. 10–21;

15. Кулагин В.А., **Соколов Н.Ю.** Математическое моделирование режимов работы тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов. *Безопасность и живучесть технических систем: материалы и доклады V Всероссийской конференции: в 3 т.* (Красноярск, 12–16 октября 2015 года). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. Т. 2. С. 6–10.

16. **Соколов Н.Ю.**, Кулагин В.А. Оптимизация тепловых труб для бортовой аппаратуры космического аппарата. *Современные проблемы радиоэлектроники: Матер. XX Всерос. НТК.* Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017.

17. **Соколов Н.Ю.** Определение теплофизических характеристик гипертеплопроводящих секций (ГТПС). *Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: материалы и доклады IV НТК МС, АО «ИСС».* Железногорск, 2017.