

На правах рукописи



**Поляков Павел Олегович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПЛОСКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**

Специальность

05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель                    д.ф.-м.н., профессор  
**Рабинский Лев Наумович**

Официальные оппоненты:            **Попов Виктор Сергеевич**  
д.т.н., профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ»

**Харченко Кирилл Дмитриевич**  
к.ф.-м.н., Публичное акционерное общество «Авиационная холдинговая компания «Сухой», начальник бригады

Ведущая организация:                **Институт прикладной механики Российской академии наук (г. Москва)**

Защита состоится «18» декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.10,  
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена разработке методов обеспечения тепловых режимов бортовых радиолокационных систем летательных аппаратов, основанных на применении плоских тепловых труб.

**Актуальность темы диссертации** определяется требованием интенсивного охлаждения высокочастотных бортовых радиолокационных систем, способных повысить разрешающую способность, точность, помехозащищенность, устойчивость к ионизации атмосферы и дальность обслуживания малоразмерных объектов. Работа ориентирована на создание оптимальных систем отвода тепла бортовых активных фазированных антенных решеток (АФАР) для высокоточных помехозащищенных радиолокационных средств оборонного назначения и разработку эффективных методов охлаждения АФАР, которая позволит обеспечить интенсивное локальное охлаждение печатных плат и расположенных на них радиоэлектронных компонентов, что является актуальной проблемой в настоящее время.

**Целью диссертационной работы** является разработка способов интенсификации процессов теплообмена бортовых радиолокационных систем, с использованием плоских тепловых труб. Цель достигается в результате последовательно решенных **задач**:

1. Разработка конструкции приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток X- и Ka- диапазонов со встроенными плоскими тепловыми трубами для локального охлаждения и отведения тепла.

2. Разработка математической модели для теоретического описания процессов теплопереноса в приемо-передающих модулях активных фазированных антенных решеток со встроенными плоскими тепловыми трубами.

3. Определение параметров предложенной математической модели на основе экспериментальных исследований плоских тепловых труб.

4. Проведение расчетов для оценки эффективности охлаждения разработанных изделий с использованием плоских тепловых труб.

5. Экспериментальная проверка эффективности предложенных вариантов конструкций на тепловых макетах приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток. Экспериментальная проверка достоверности предложенной модели.

**Объектом исследования** являются системы охлаждения бортовых активных фазированных антенных решеток летательных аппаратов (ЛА).

**Предметом исследования** являются теплообменные процессы и методы их интенсификации в системах охлаждения приемо-передающих модулей (ППМ) высокочастотных АФАР, изготавливаемых с использованием встроенных плоских тепловых труб (ТТ).

В работе используются теоретические и экспериментальные **методы исследования**. Разработанная модель для описания процессов тепломассопереноса в рассматриваемых ППМ АФАР Ка-диапазона была реализована с использованием метода конечных элементов в системе Comsol.

**Научная новизна** результатов состоит в том, что впервые разработано научно-методическое обеспечение для реализации эффективного локального охлаждения АФАР высокочастотного диапазона с использованием плоских тепловых труб. В том числе получены тестовые решения задач тепломассопереноса в применяемых капиллярно-пористых материалах, которые использованы для верификации применяемых ППМ бортовых АФАР. Для применяемых вариантов плоских ТТ проведено уточненное моделирование процессов тепломассопереноса с учетом эффектов капиллярности, конденсации/испарения теплоносителя и силы тяжести. Установлены необходимые характеристики ТТ, включая параметры капиллярного давления и коэффициенты проницаемости, необходимые для проведения моделирования и проекторочных расчетов. На основании выполненных исследований и разработанной конструкторской документации изготовлены и испытаны тепловые макеты с различными вариантами конструкции для ППМ бортовых АФАР для определения эффективности работы применяемых ТТ в условиях, приближенных к натурным.

**Обоснованность и достоверность** разработанных методов, сформулированных в диссертационной работе и полученных на их основе результатов, обеспечивается проведенными теоретическими расчетами, основанными на строгих подходах инженерного проектирования с использованием моделей теории тепломассопереноса. Достоверность также подтверждается применением результатов исследований для проектирования систем охлаждения действующих АФАР ЛА, в том числе патентами.

**Теоретическая и практическая значимость работы заключается** в определении требований к параметрам, разработке методики проектирования и технической реализации систем охлаждения, а также в разработке оптимальной модели и расчете параметров элементов системы охлаждения для аппаратуры с длительным непрерывным циклом работы.

**Апробация работы** проводилась на научно-технических конференциях, в частности на XVII Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», VI Международном научном семинаре «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы».

#### **Личный вклад автора в проведенные исследования**

Автором разработаны:

1. Конструктивные решения, обеспечивающие устойчивый отвод тепловой энергии с активных СВЧ элементов бортовых АФАР. В частности, способ охлаждения на базе ультратонких современных тепловых труб, обеспечивающий интенсивное

отведение тепла и обеспечивающий равномерное распределение теплового потока по корпусу модуля АФАР.

2. Аналитические и численно-аналитические решения задач тепломассопереноса в пористой среде переменной плотности с учетом эффектов капиллярности, гравитационных сил, конденсации/ испарения и выбранного типа теплоносителя.

3. Тепловые макеты ППМ АФАР, которые изготовлены и испытаны, что подтверждает эффективность предложенных конструктивных решений и разработанной математической модели.

### Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, 3 из них – в рецензируемых научных изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 75 наименований; содержит 129 страниц основного текста, 75 рисунков, 7 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ

**В первой главе** приведен анализ проблем обеспечения отвода тепла и применение плоских тепловых труб в активных фазированных антенных решетках.

С повышением рабочей частоты такие характеристики АФАР ЛА, как разрешающая способность, точность, помехозащищенность, устойчивость к ионизации атмосферы, могут быть существенно улучшены. Однако повышение частотных диапазонов неизбежно ведет к увеличению плотности тепловых потоков, реализующихся в процессе работы приемно-передающих модулей. Фактически, улучшение технических характеристик современных радиолокационных систем большой мощности, работающих в высокочастотных диапазонах, напрямую связано с возможностью создания эффективных систем охлаждения.

Можно отметить, что применение тепловых труб (крупногабаритных, цилиндрической формы или даже плоских) в различных системах терморегулирования, в том числе в АФАР космических аппаратов, известно достаточно давно. Принцип работы тепловых труб основан на двухфазном механизме передачи тепла – конвекцией теплоносителя в паропроводе с его последующим возвратом капиллярными силами, действующими в пористой структуре - фитиле, нанесенном на внутренние стенки. Вследствие этого тепловые трубы обладают очень высокой эффективной теплопроводностью, особенно в условиях отсутствия гравитации – до 20000 Вт/(мК). По известным в литературе данным, тепловые трубы в составе наземных или АФАР ЛА, где действуют существенные гравитационные и инерционные нагрузки, практически не использовались ранее.

В настоящее время существует не мало технических решений по охлаждению как бортовых АФАР ЛА, которые применяются в военных истребителях, ЛА по типу

ракет средней и малой дальности и т. д. Так, например, в бортовой АФАР Т-50 используется жидкостная система охлаждения, гидравлический канал которой заполнен охлаждающей жидкостью. В ЛА по типу ракет класса воздух-воздух и воздух-поверхность в головках самонаведения для эффективной работы отводом тепла (хладагентом) служит газообразный азот, который подается через азотовод из баллона носителя ракеты.

Однако, частым случаем поломок достаточно габаритных и/или сложных систем охлаждения служит подтекание жидкости с последующей разгерметизацией системы. Проблемой так же является замена отдельных узлов, наличие крупногабаритного и тяжелого блока охлаждения, поломки которого и перегрев системы приводят к ухудшению радиотехнических характеристик и снижению времени наработки на отказ.

В настоящее время активно разрабатываются или модернизируются перспективные T/R модули (Transmit/Receive Module) с различными вариантами охлаждения. Для повышения эффективности охлаждения таких модулей АФАР в работах авторы проводят исследования корпусов (размеры  $490 \times 275 \times 52$  мм) со встроенными ребрами охлаждения. Численное моделирование позволило получить распределение температуры по поверхности основания корпуса для трех значений скорости воздушного потока в межреберных каналах: 2, 6 и 9 м/с. Показано, что максимальная температура поверхности в местах установки микроволновых элементов при скорости воздушного потока 2 м/с составляет  $90,6$  °С. При скорости воздуха 6 м/с, температура в этих областях снижается до  $77,1$  °С и при скорости 9 м/с до  $73,0$  °С. Чтобы сделать воздушное охлаждение еще более эффективным и снизить температуру поверхности корпуса, были использованы тепловые трубы.

Таким образом эффективность работы плоских ТТ в настоящее время быстро возрастает за счет использования передовых методов расчета, новых разрабатываемых капиллярно-пористых структур и сложнocomпонентных теплоносителей. Для охлаждения АФАР применение плоских тепловых труб находится на стадии НИР и это направление, как показывает обзор открытых литературных источников, активно развивается в России и за рубежом. Поэтому предлагаемое решение по созданию систем охлаждения на основе плоских тепловых труб обладает актуальностью, и аналогичные решения широко применяются в различных отраслях промышленности (в современной микроэлектронике и микропроцессорной технике).

**Во второй главе** описаны разработанные варианты конструкций ППМ АФАР X- и Ka- диапазонов со встроенными плоскими тепловыми трубами. Использование плоских ТТ в составе конструкций ППМ АФАР позволит реализовать эффективное охлаждение активных радиоэлектронных компонентов и, таким образом, увеличить срок наработки на отказ и повысить стабильность радиотехнических характеристик АФАР. Данные варианты выполнены на основе существующих конструкций. Суммарная мощность тепловыделения каждого ППМ составляет 80 Вт.

Для этой мощности были применены тепловые производства ООО «НПО «Центротех». Наиболее теплонагруженные элементы расположены в передней части модуля усилительного со стороны излучателей, это предварительный и выходной усилители. Для изготовления и испытания тепловых макетов были разработаны тепловая и электрическая принципиальная схемы (в соответствии с рисунком 1).

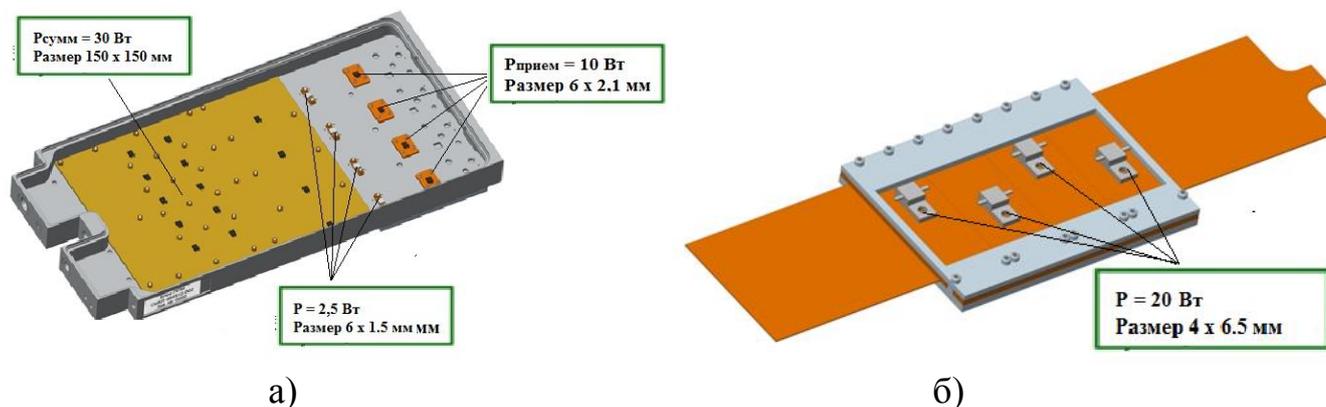


Рисунок 1 - Тепловые схемы для тепловых макетов X- (а) и Ka- (б) диапазонов

Варианты конструкции ППМ X- диапазона предполагают размещение 2-х тепловых труб как с внешней, так и с внутренней сторон корпуса ППМ также 2-х тепловых труб, которые необходимы для отведения тепла от зон наибольшего теплового нагружения (в соответствии с рисунком 2).

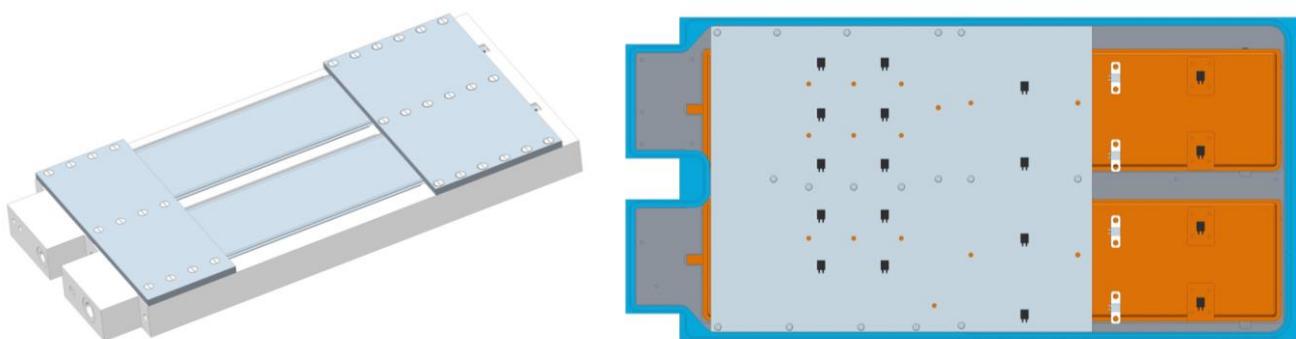


Рисунок 2 - Варианты конструкции со встроенными плоскими тепловыми трубами с внешней (слева) и внутренней сторон

Для варианта конструкции ППМ Ka- диапазона (см. рисунок 1б) плоская тепловая труба является одновременно охлаждающим устройством и несущей конструкцией. Свободные концы ТТ располагаются справа и слева от модуля, что позволяет в дальнейшем закрепить на них жидкостные или воздушные теплообменники. Для обеспечения размеров ППМ и шага решетки каждая ТТ с установленными модулями является частью антенной решетки, т.е. подрешетка собирается послойно.

В третьей главе представлены результаты моделирования процессов тепломассопереноса в плоских тепловых трубах, работающих в составе приемопередающих модулей. Во-первых, на основе стандартных соотношений, определяющих пределы работы тепловых труб (капиллярный, вязкостной и т.д.), проведены проектировочные расчеты работоспособности разработанных вариантов конструкций ППМ АФАР. Показана возможность применения используемых плоских тепловых труб в составе ППМ с мощностью тепловыделения до 80 Вт. Далее, для проведения детализированных расчетов предложена модель, позволяющая прогнозировать эффективность работы плоских тепловых труб в составе ППМ АФАР. В модели учитываются процессы теплопередачи в стенке плоской тепловой трубы, фильтрация теплоносителя в слое капиллярно-пористого материала (фитиля) и моделируется гидродинамика пара в паропроводе. Решение строится для установившихся режимов работы в двумерной области, занятой плоской тепловой трубой, что является допустимым вследствие ее малой толщины. На основе метода конечных элементов ищется решение трех связанных уравнений типа Пуассона, описывающих 1) теплопередачу в плоской стенке на основе двумерного уравнения теплопроводности, 2) фильтрацию в слое фитиля по модели Дарси и 3) течение пара в паропроводе на основе решения для скорости ламинарного потока между двумя плоскими стенками, которое позволяет свести решение задачи гидродинамики о течении несжимаемого вязкого газа к решению задачи о распределении давления в двумерной области. Все три уравнения имеют члены, которые определяются параметрами процессов теплообмена с внешней средой и параметрами конденсации/испарения теплоносителя внутри тепловой трубы. Формулировка применяемой модели имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} \in \Omega: \\ k_s H_s \nabla^2 T = \phi + h(T - T_{sat}(P_v)), \\ \rho_l \nabla \cdot (H_l \mathbf{u}_l) = -\alpha, \\ \rho_v \nabla \cdot (H_v \mathbf{u}_v) = \alpha + \varepsilon \frac{\partial P_v}{\partial t}, \\ \mathbf{x} \in \partial\Omega: \nabla T \cdot \mathbf{n} = 0, \mathbf{u}_v \cdot \mathbf{n} = 0, \mathbf{u}_l \cdot \mathbf{n} = 0, \\ t = t_0: T = T_0, P_v = P_l = P_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

где расчетная область и ее граница обозначены, как  $\Omega$  и  $\partial\Omega$ ,  $k_s$  – теплопроводность медной стенки,  $H_s$  – ее толщина,  $H_l$ ,  $H_v$  – толщина фитиля и высота паропровода, соответственно,  $T(t, x, y)$  – поле температуры,  $\mathbf{n}$  – вектор единичной нормали к границе расчетной области,  $\phi$  – подводимый/отводимый тепловой поток, который в зоне испарителя равен  $\phi_0$ , а в зоне конденсатора ( $-\phi_0 \eta$ ), где  $\eta$  – отношение площади конденсатора к площади испарителя,  $\alpha = \frac{h(T - T_{sat}(P_v))}{L_v}$  – скорость испарения

теплоносителя,  $L_v$  – теплота парообразования,  $T_{sat}$  – температура насыщенного пара,  $h_p = k_l/H_l$  – коэффициент теплопередачи от стенки корпуса основания к внутреннему пространству (паропроводу), который определяется отношением коэффициента теплопроводности слоя фитиля, насыщенного жидкостью, к его толщине; скорость фильтрации жидкого теплоносителя и течения пара определяются соотношениями:

$$\mathbf{u}_l = -\frac{K}{\mu_l(T)} \nabla P_l, \quad \mathbf{u}_v = -\frac{12H_v^2}{\mu_v(T)} \nabla P_v, \quad \text{где } P_l(t,x,y), P_v(t,x,y) \text{ – искомые функции давления в}$$

фитиле и в паропроводе, соответственно. Полное давление в фитиле вычисляется с учетом гравитационных сил путем прибавления постоянного слагаемого, определяемого через плотность, размеры и угол наклона тепловой трубы, к вычисляемому значению давления в  $P_l(t, x, y)$ .

Для учета зависимости температуры насыщения пара от давления в паропроводе  $T_{sat}(P_v)$ , рассматривается вариант нестационарной формулировки задачи гидродинамики пара с фиктивным параметром  $\varepsilon = 10^{-7}$  (см. (1)), которая используется для определения давления пара в установившемся режиме с учетом заданных начальных условий для давления разрежений внутри тепловой трубы  $P_0$  (переходный режим не рассматривается),

Особенностью предложенной модели по сравнению с известными ранее является предложенный подход к моделированию участков тепловой трубы, на которых достигается капиллярный предел. В этом случае происходит, фактически, остановка фильтрации теплоносителя и перегрев соответствующего участка поверхности тепловой трубы. Для учета этих эффектов в расчетах, коэффициент теплопередачи от стенки корпуса ТТ к зоне паропровода, вычисляется, как отношение теплопроводности насыщенного фитиля к его толщине, только вне зоны достижения капиллярного предела, а внутри этой зоны задается некоторое малое значение этого коэффициента, что позволяет учесть «выключение» из двухфазного механизма теплопередачи соответствующих участков тепловой трубы:

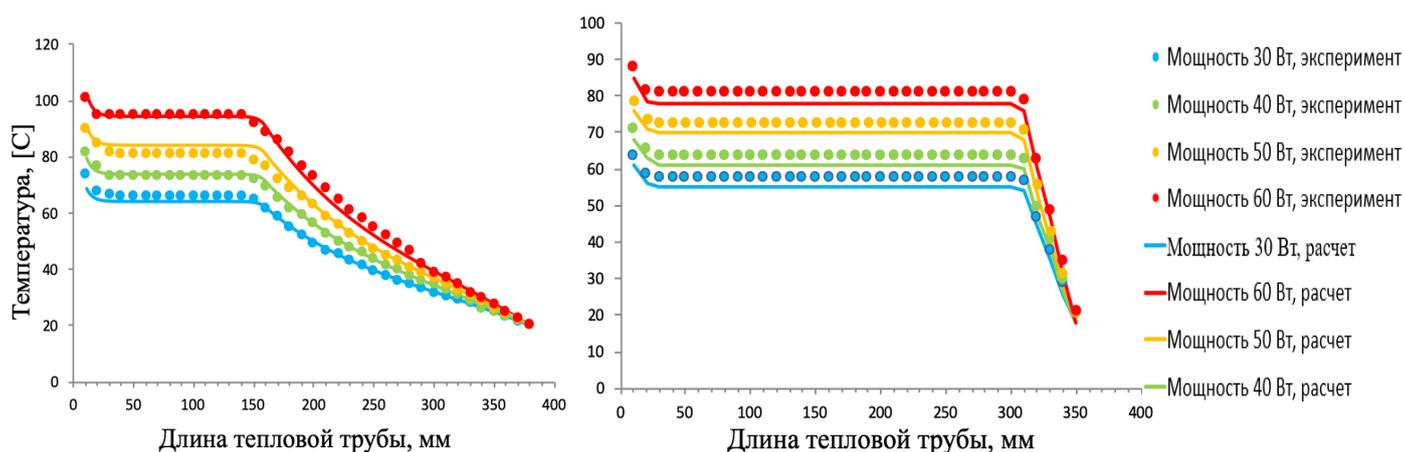
$$h_p = \begin{cases} k_l / H_l, & P_l - P_{l,\min} < P_c \\ 0.001k_l / H_l, & P_l - P_{l,\min} \geq P_c \end{cases}$$

Для реализации численного конечно-элементного моделирования в рамках формулировки (1) была использована система Comsol Multiphysics. Расчеты проводились с использованием интерфейса General Form PDE.

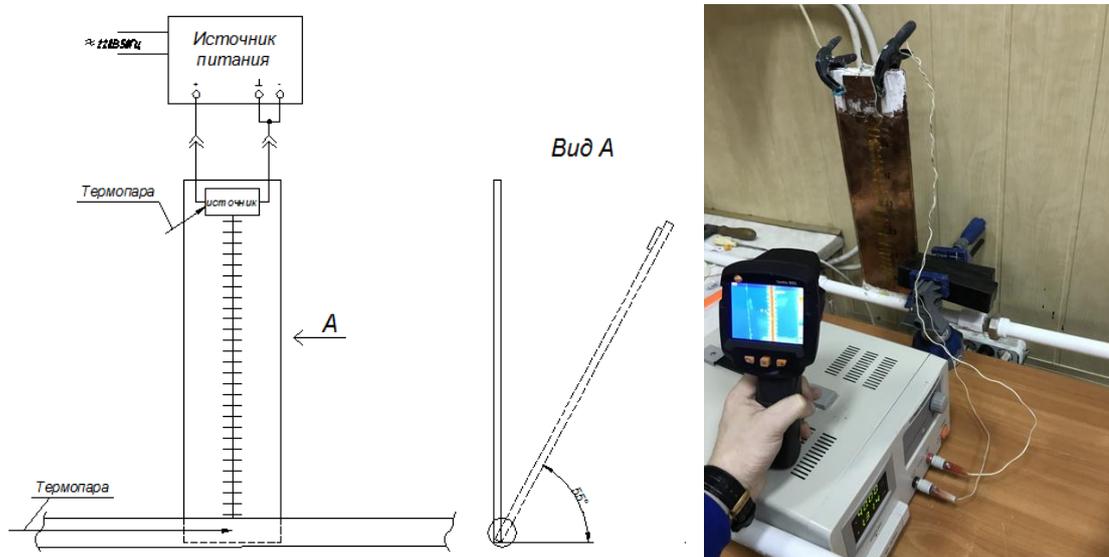
Параметры модели были определены экспериментально (пористость, проницаемость, капиллярное давление фитиля) и взяты из справочных литературных источников (теплопроводность меди, воды, вязкость воды и пара, давление насыщения пара и т.д.).

Пример сопоставления решения в рамках предложенной модели с тестовым экспериментом, в котором испытывалась плоская тепловая труба с единственным источником (резистор, закрепленный на термопасте на поверхности тепловой трубы),

представлен в соответствии с рисунком 3. На противоположном (нижнем) конце тепловой трубы, устанавливалось охлаждение проточной водой. На рисунке 3а показано распределение температуры по поверхности трубы при различных мощностях тепловыделения на источнике, которое в эксперименте измерялось с использованием тепловизора. Видна хорошая согласованность модели и экспериментальных данных. На рисунке 3б показана схема проведения тестового эксперимента.



а)



б)

Рисунок 3: а) - сопоставление результатов расчетов (линии) и экспериментальных данных (точки) по изменению температуры по длине ТТ при различной мощности источника тепловыделения для вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) ориентации тепловой трубы; б) - схема проведения тестового эксперимента

На основе предложенной модели были проведены расчеты разработанных вариантов ППМ АФАР, в которых учитывалось расположение тепловыделяющих элементов, моделирующих радиоэлектронные компоненты ППМ, их мощность тепловыделения, толщина тепловой трубы, ориентация ППМ в испытаниях. По

результатам расчетов были получены прогнозы о значениях температуры тепловыделяющих элементов при заданных параметрах мощности тепловыделения. На основе расчетов спрогнозирована возможность применения разработанных корпусов ППМ АФАР на заданные режимы работы. Примеры результатов расчетов представлены в соответствии с рисунком 4.

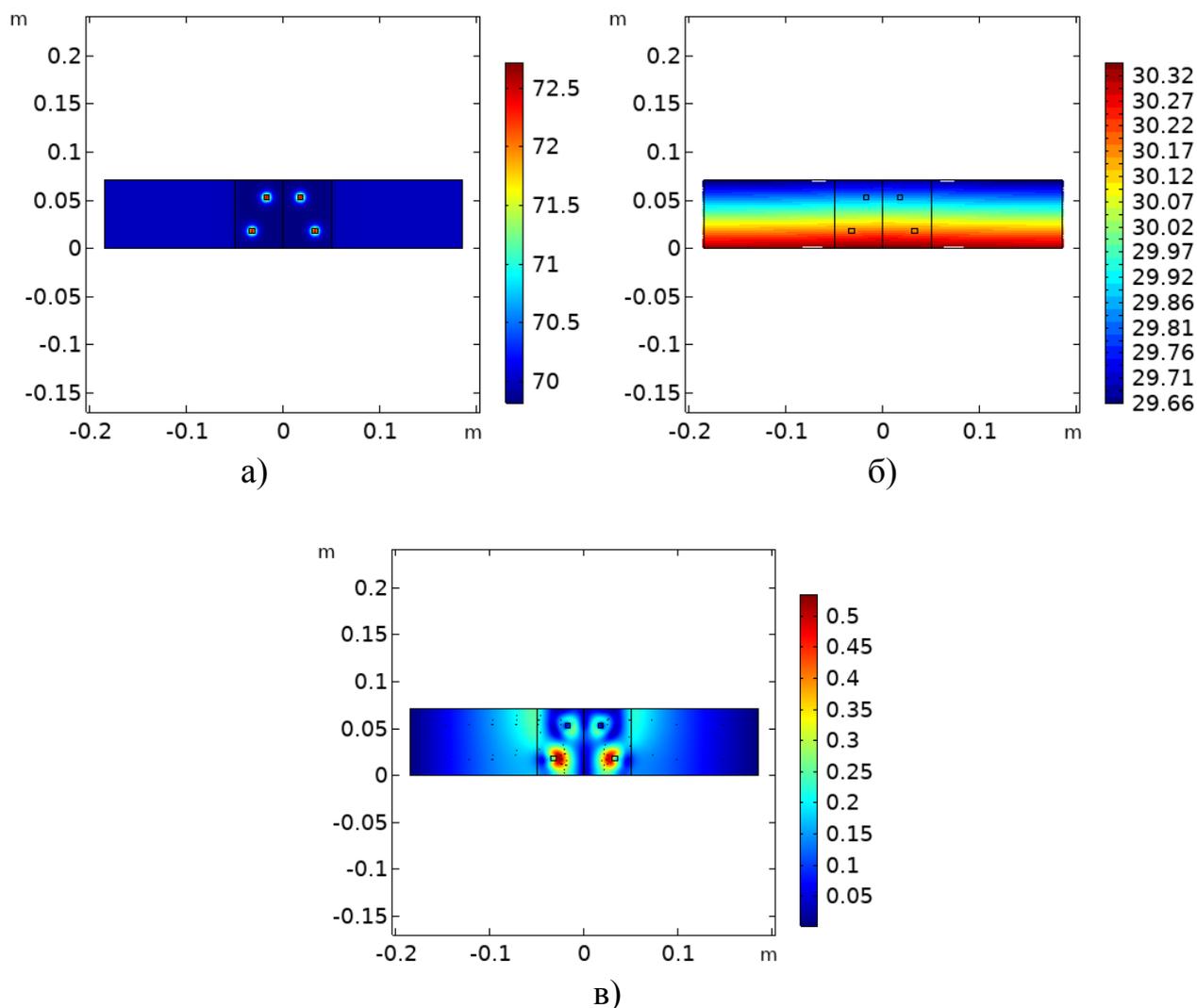


Рисунок 4 – Примеры результатов расчетов для ППМ Ка-диапазона, а – температура поверхности тепловой трубы [°C], б – давление жидкости в фитиле [кПа], в – скорость течения пара в паропроводе [м/с]. Ориентация вертикальная

**В четвертой главе** описана технология изготовления и испытание 3-х разработанных тепловых макетов для имитации тепловых нагрузок во время работы электронного ППМ бортового АФАР и проверки работы эффективности системы охлаждения с применением плоских тепловых труб.

Для изготовления были представлены металлические коробка-заготовки. На начальном этапе были подготовлены эскизные чертежи и написана САМ-программа для числового программного управления (ЧПУ). В качестве оборудования для

фрезерования корпусов был использован вертикальный фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ «HURCO VTXU».

Перед проведением технологических операций было решено несколько задач, а именно:

1. Разработка САD-чертежей для макетов корпусов.
2. Анализ САD-деталей и получению от центра ЧПУ данных о типе материала и размерах.
3. Конвертация (при помощи САМ-программы) цифрового объекта в понятные станку команды в формате G-code.

Конструктивное исполнение тепловых макетов (в соответствии с рисунками 5 и 6) выполнено по аналогии конструктивного исполнения ППМ. Внутреннее устройство закрывается термопластичной прозрачной пластиковой крышкой (оргстеклом).

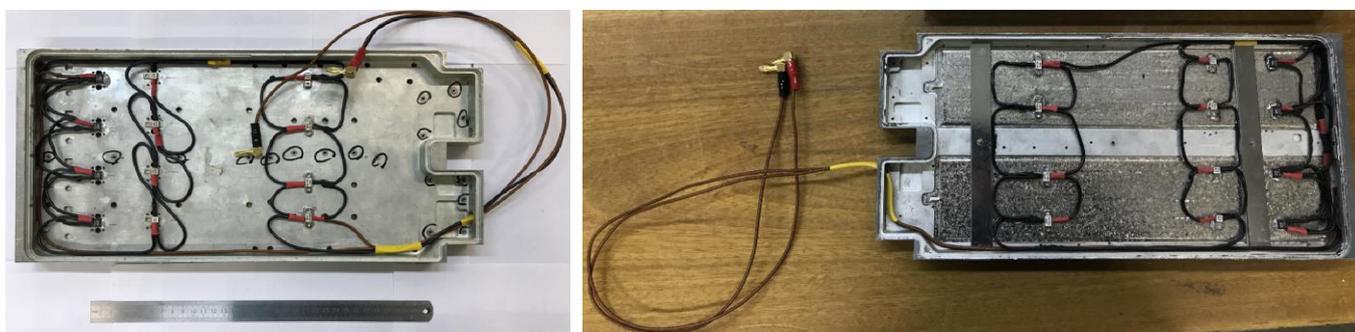


Рисунок 5 – Внешний вид тепловых макетов с вариантом конструкции ППМ X- диапазона после изготовления

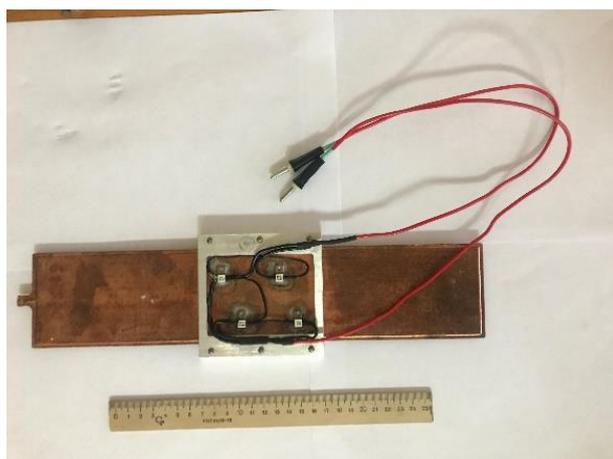


Рисунок 6 – Внешний вид теплового макета ППМ Ka- диапазона. Внешний вид

Задачей испытания является определение предельных значений мощностей тепловыделения тепловых эквивалентов для заданных конструктивных вариантов крепления тепловых труб, при штатных вариантах пространственного расположения ППМ X- и Ka- диапазонов.

Для проведения испытаний использовался источник постоянного тока QJ3020E 30V-20A к которому были подключены поочередно тепловые макеты. Для выявления температуры, в целях обеспечения точности измерений, был выбран контактный измеритель температуры UT322 и портативный тепловизор Testo 865 с разрешением экрана 160 x 120.

В процессе измерения номинальная погрешность измерения источника постоянного тока QJ3020E 30V-20A составила  $\pm 0,4$  В, контактного измерителя температуры UT322  $\pm 0,1$  °С и тепловизора Testo 865  $\pm 0,12$  °С.

В связи с тем, что корпус теплового макета имеет покрытие сплава олово–висмут (является сильным отражателем длинноволнового инфракрасного измерения с низким коэффициентом излучения), что сильно затрудняет определение температуры, было принято решение приклеить к измеряемому объекту на отдельных участках термостойкую полиамидную ленту ( $\varepsilon = 0,95$ ) с рабочей температурой до 300 °С, обеспечив тем самым расположение контрольных измерительных точек для измерения температуры.

Тепловые макеты для ППМ X- диапазона испытывались в двух вариантах с жидкостным охлаждением, путём крепления внешнего жидкостного теплообменника в зоне конденсации ТТ с внешней стороны корпуса и в зоне испарения ТТ (в соответствии с рисунком 7) так же с внешней стороны корпуса. Испытания проводились в вертикальном расположении, под углом  $55^{\circ}$  на ребре и в горизонтальном расположении. Тепловые макеты испытывались при подаваемой мощности в 85 Вт.

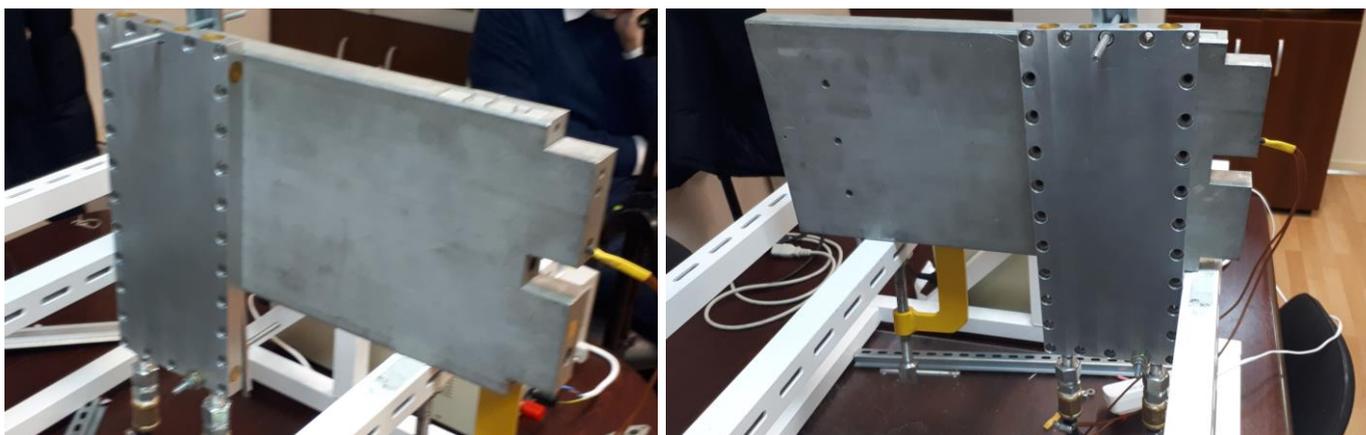
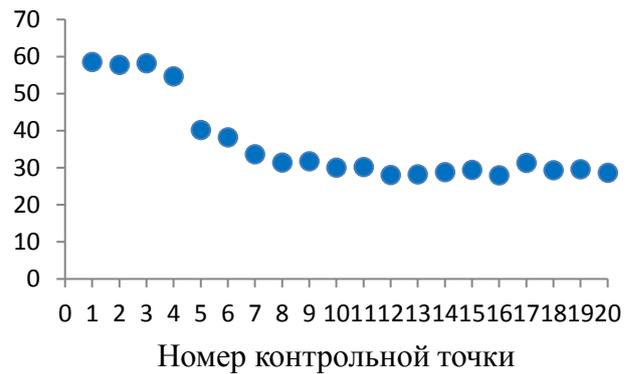
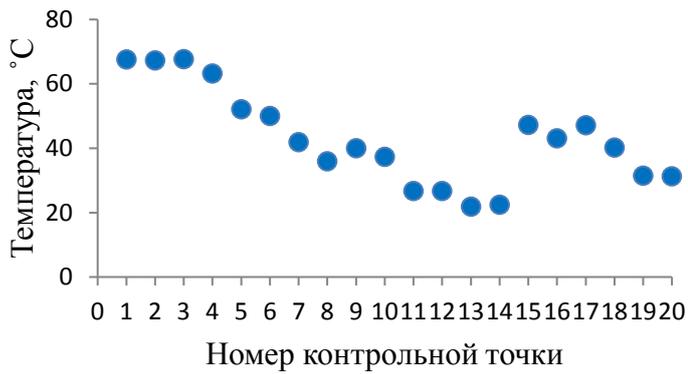


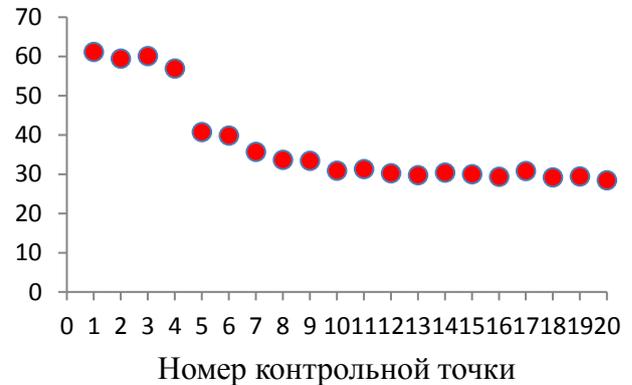
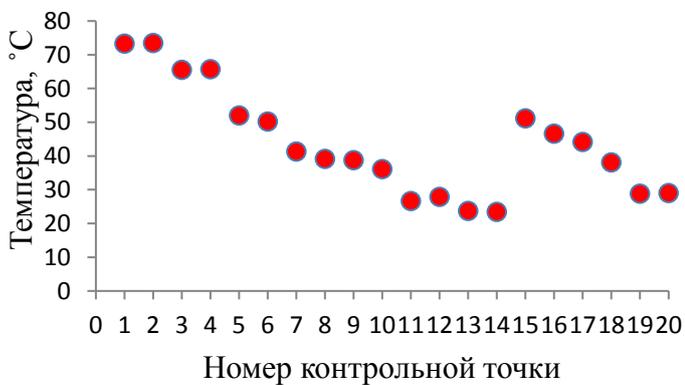
Рисунок 7 – Вариант крепления жидкостного теплообменника с внешней стороны корпуса ППМ в зонах испарения (слева) и конденсации (справа) тепловых труб

Более эффективным является вариант расположения теплообменника в зоне испарения тепловых труб (передней части макета) - в непосредственной близости от источника максимального тепловыделения (в соответствии с рисунком 8).

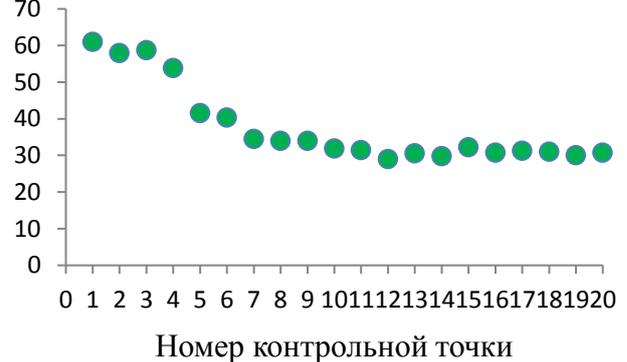
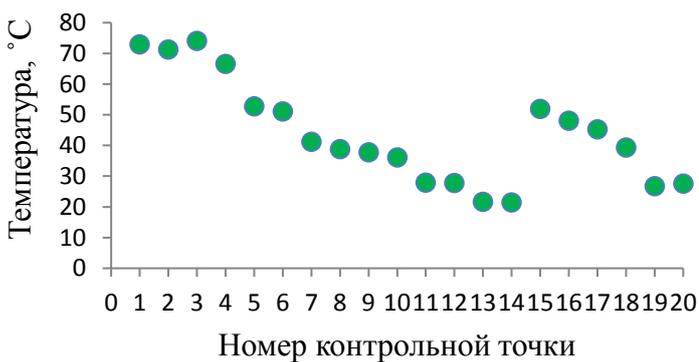
Тепловой макет с внутренним расположением тепловых труб оказался менее эффективным с позиции теплоотвода (в соответствии с рисунками 9).



а)

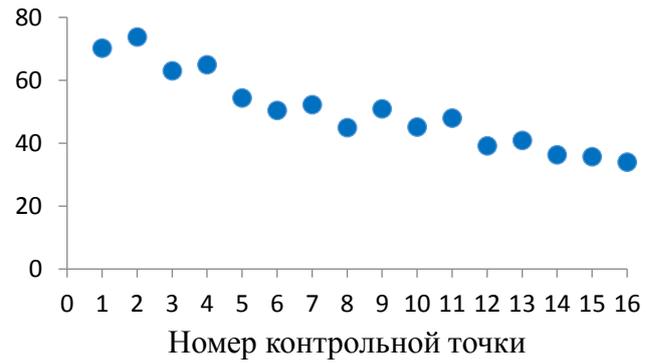
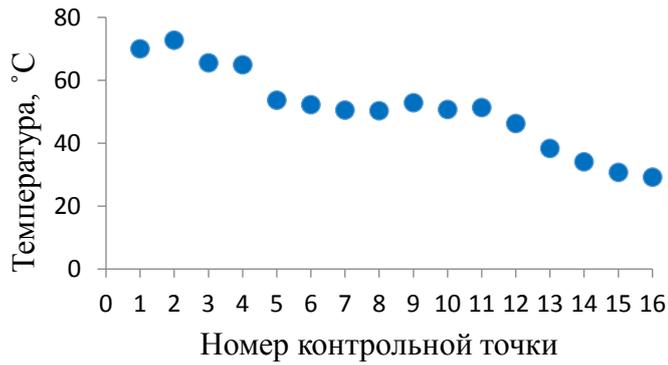


б)

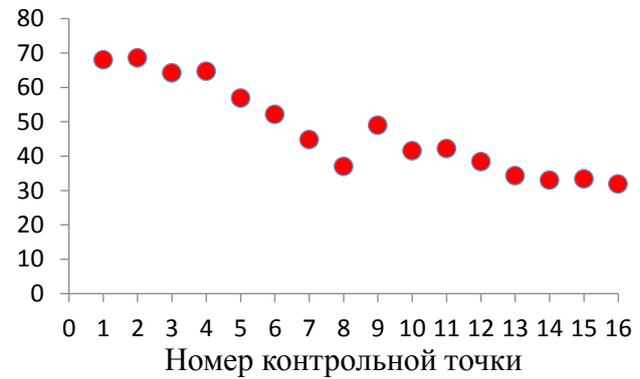
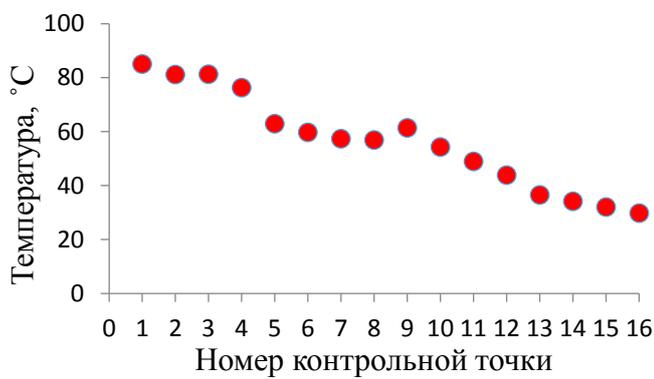


в)

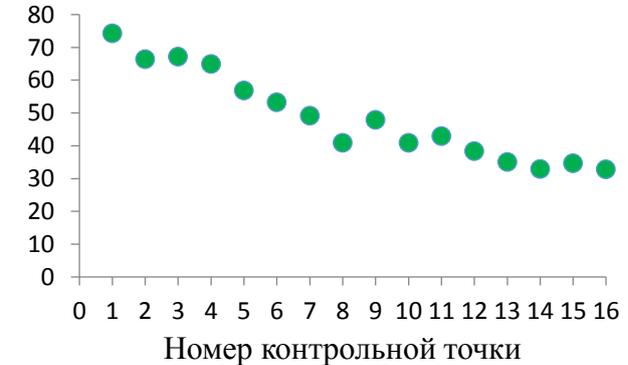
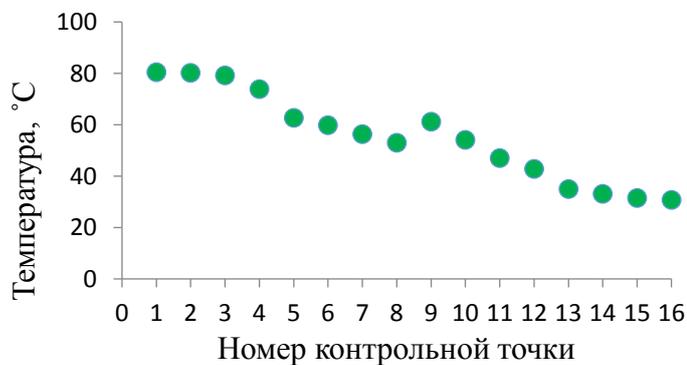
Рисунок 8 – Измеренные значения температуры варианта конструкции с внутренним расположением тепловых труб с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (слева) и в зоне испарителя (справа): а) при горизонтальном расположении; б) при угле наклона  $55^{\circ}$  на ребре; в) при вертикальном расположении



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Измеренные значения температуры варианта конструкции 2 с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (слева) и в зоне испарителя (справа):  
 а) при горизонтальном расположении; б) при угле наклона  $55^{\circ}$  на ребре;  
 в) при вертикальном расположении

Для определения эффективности работы тепловых труб проведено сравнение, в котором вместо ТТ установлены аналогичные по габаритам медные пластины

Испытания проводились для двух вариантов расположения теплообменника: в зонах конденсации и испарения (в соответствии с рисунком 10).

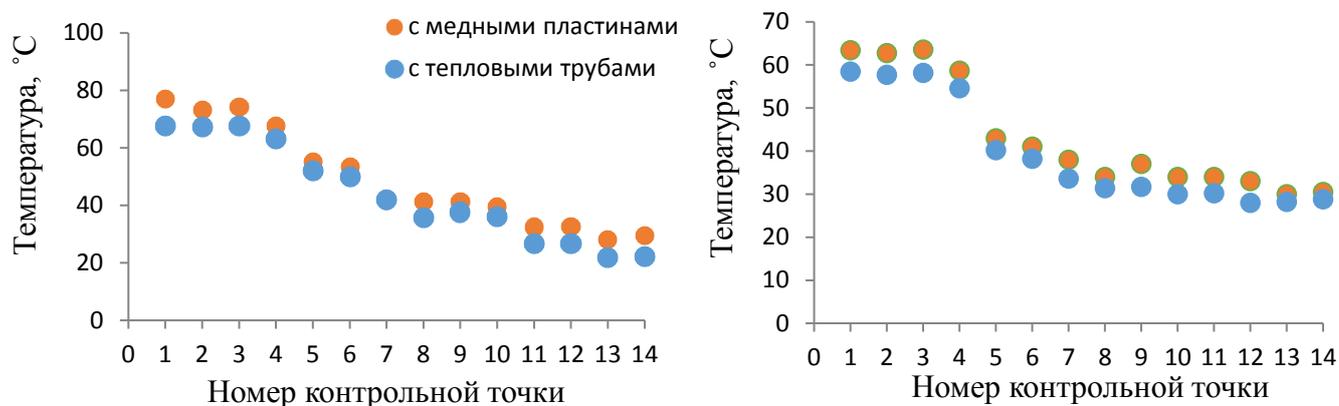
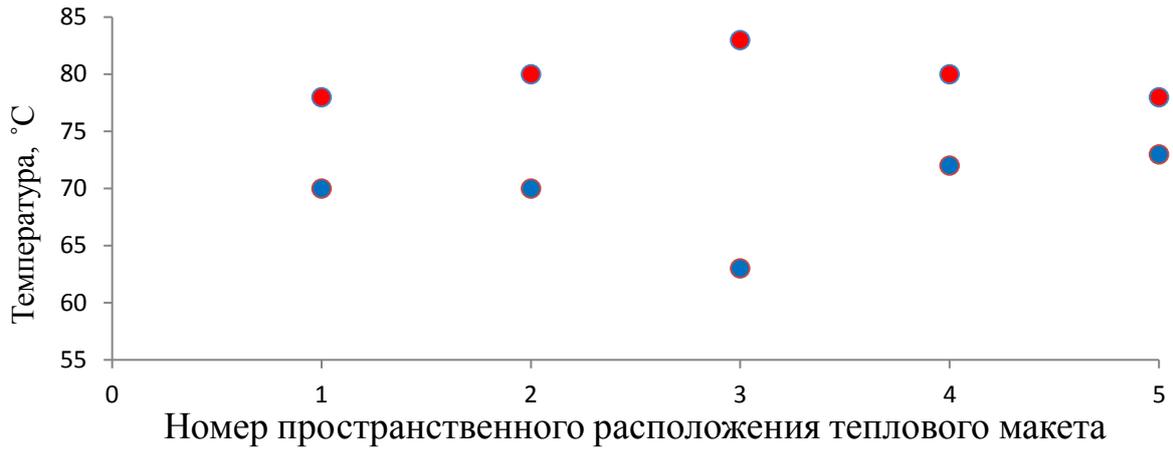


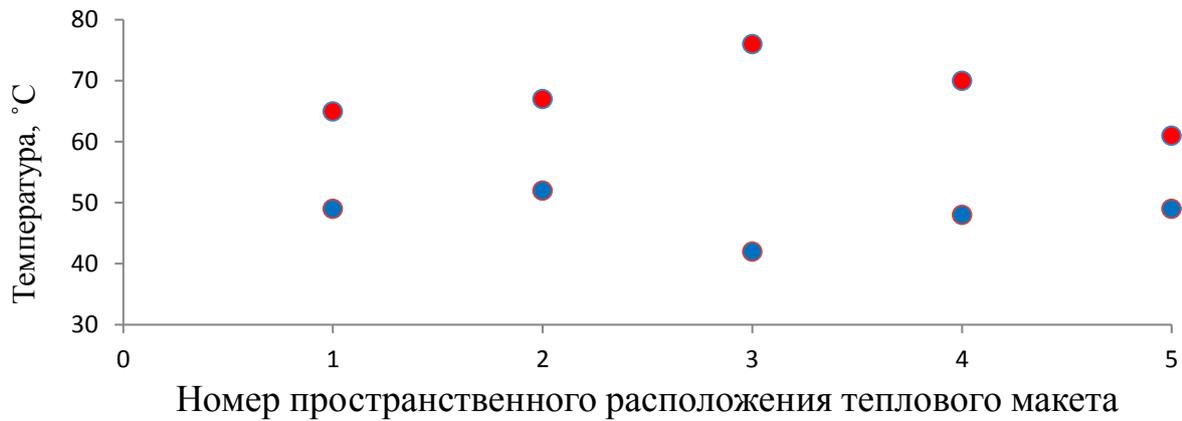
Рисунок 10 – Измеренные значения температуры варианта конструкции ППМ X-диапазона с тепловыми трубами и аналогичными им по размерам медными пластинами с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (слева) и в зоне испарителя (справа)

Измеренные значения температуры для теплового макета ППМ Ka-диапазона при различной ориентации в пространстве представлены в соответствии с рисунком 11. По оси X показан порядок положения теплового макета (в соответствии с рисунком 12).

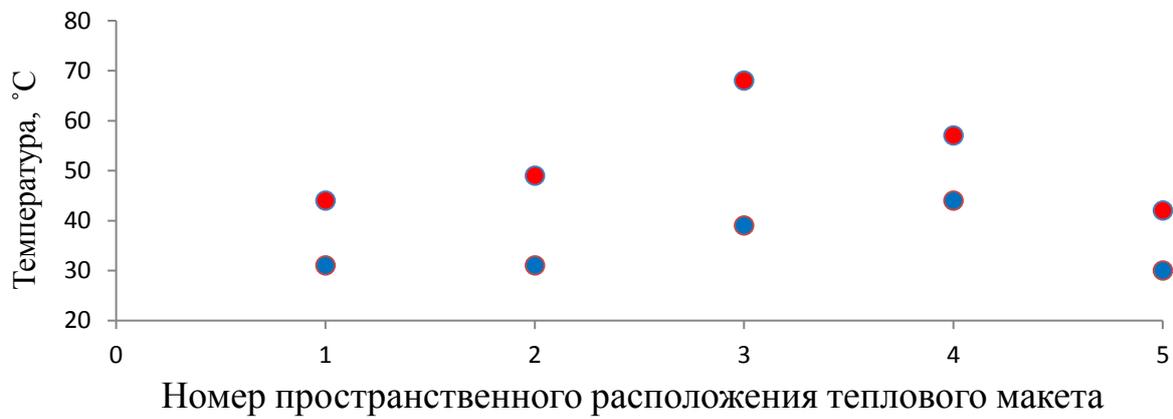
На рисунке 11а указаны значения максимальных температур для измеряемой точки № 1. Для измеряемой точки № 2 (рисунок 11б) разница по температуре при положениях 1, 2, 4, 5 составляет в среднем 15 °C, однако при горизонтальном положении (3) разница составляет 24 °C (с 76 °C до 42 °C). Для измеряемой точки №3 (рисунок 11в), которая максимально удалена от зоны максимального тепловыделения, разница по температуре при положениях 1, 2, 4, 5 составляет также в среднем 15 °C, однако при горизонтальном положении (3) разница составляет 29 °C (с 68 °C до 39 °C).



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Измеренные значения температуры теплового макета для варианта конструкции 3: а) свободная конвекция; б) воздушное охлаждение

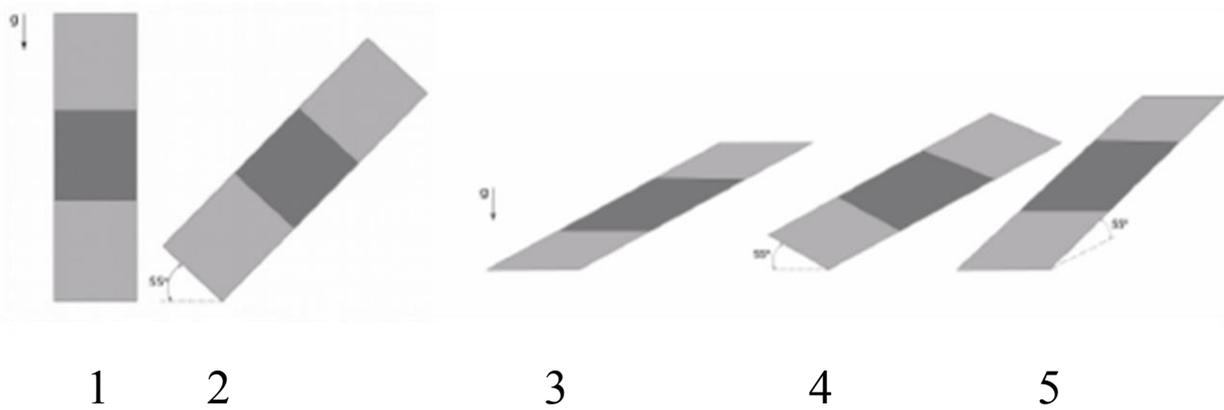


Рисунок 12 – Порядок положения теплового макета с вариантом конструкции 3: 1 - вертикальное; 2 - под углом  $55^{\circ}$  на ребре; 3 - горизонтальное; 4 - под углом  $55^{\circ}$  по короткой стороне; 5 - под углом  $55^{\circ}$  по длинной стороне

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработана методика обеспечения тепловых режимов радиолокационных систем летательных аппаратов с применением плоских тепловых труб. На основе экспериментально-теоретических исследований впервые реализованы эффективные системы охлаждения радиолокационных систем летательных аппаратов. Решены научные задачи, позволяющие оценить тепломассообменные процессы и методы их интенсификации в системах охлаждения прямо-передающих модулей высокочастотных активных фазированных антенных решеток.

Предложены и спроектированы конструкции прямо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток X- и Ka- диапазона со встроенными плоскими тепловыми трубами для локального охлаждения и отведения тепла. Разработана документация для изготовления корпусов модулей, и проведена оценка их весовой эффективности. Отличительной особенностью предложенных вариантов конструкций является применения новых типов теплоотводящих элементов. Спроектированные варианты конструкции с применением плоских тепловых труб обеспечивают снижение веса изделий на 14%.

Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса в спроектированных изделиях, в том числе впервые проведены расчеты работы плоских тепловых труб в составе прямо-передающих модулей. Разработанная математическая модель позволяет получать прогнозы параметров работы плоских тепловых труб с приемлемой для обеспечения тепловых режимов модулей точностью.

На основе экспериментальных исследований физических характеристик плоских тепловых труб определены параметры предложенной расчетной модели.

Проведены расчеты для оценки эффективности охлаждения разработанных изделий с использованием плоских тепловых труб. Результаты расчетов показали

увеличение эффективности охлаждения на 13% по сравнению с существующими конструктивными решениями.

Проведена экспериментальная проверка эффективности предложенных вариантов конструкций на тепловых макетах приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток X- и Ka- диапазона. Проверка показала достоверность расчетной модели.

По результатам выполнения диссертационной работы зарегистрировано два патента.

Перспективным направлением дальнейших исследований является обобщение предложенной методики для решения комплексных задач при создании высокоэффективных теплоотводящих конструкций летательных аппаратов, функционирующих в условиях экстремальных тепловых воздействий.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Rabinskiy, L.N., Polyakov, P.O., Solyaev, Y.O. Optimization of the wick thickness in a flat plate heat pipe with multiple heat sources, *Periodico Tche Quimica*, Volume 30, 2018, 15(1), 433-440.
2. Lurie, S.A., Solyaev, Y.O., Rabinskiy, L.N., **P. O. Polyakov**, I. Sevostianov . Mechanical behavior of porous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics manufactured with 3D printing technology. *J Mater Sci* 53, 4796–4805 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1881-0>
3. Rabinskiy L.N., Solyaev, Y.O., **Poliakov P.O.** Numerical modeling of residual thermal stress in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based high-porous composite ceramics, 2016, 111(2).
4. Поляков П.О., Горюнов Р.В., Соляев Ю.О. Изготовление и испытание тепловых макетов приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки, выполненных с применением плоских тепловых труб // *Тепловые процессы в технике*. 2020. Т. 12. № 8. С. 348–357. DOI: [10.34759/tpt-2020-12-8-348-357](https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-8-348-357)

### Тезисы докладов, материалы конференций:

1. Поляков П.О., Токмаков Д.И., Горюнов Р.В., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Применение плоских тепловых труб для охлаждения приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток. Тезисы докладов XVII Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии». 2019 г. Россия. Москва.

2. Поляков П.О., Прокофьев А.В., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. О задаче оптимального проектирования ультратонких тепловых труб для систем охлаждения приемо-передающих модулей АФАР. Тезисы докладов VI Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». 2017 г., г. Москва.

3. Поляков П.О., Рабинский Л.Н. Исследование теплового состояния приемо-передающего модуля АФАР, охлаждаемого с использованием плоских тепловых труб VII Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы» Московский авиационный институт 2018.

4. Поляков П. О., Дубовик И. Н., «Калибровка Антенных постов цифровой дециметровой мобильной радиолокационной станции «Демонстратор», тезисы докладов на тему: «Радиолокация и связь – перспективные технологии» 2014 г., труды XII Молодежной научно-технической конференции.