

На правах рукописи



Маскайкин Владимир Андреевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ
ПО СОЗДАНИЮ СРЕДСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ
ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ АРКТИКИ**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация
летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: **Махров Владислав Петрович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Полтавский Александр Васильевич,**
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник лаборатории «Управления сетевыми системами»

Басов Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», МО, г. Королев, начальник отделения систем терморегулирования

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел» им. И.И.Торопова», г. Москва

Защита состоится «19» октября 2023 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=173200

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н.



Стрелец Дмитрий Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На современном этапе развития авиации значительная роль отводится управляемым беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) разнообразных типов и видов, способных выполнять широкий круг научных, народно-хозяйственных и оборонных задач. Эта роль для БПЛА существенно возрастает при освоении обширных территорий Арктической зоны нашей страны, где эксплуатация обычных ЛА – самолётов и вертолётов существенно ограничена многими факторами. Действительно, природно-климатические условия в Арктических районах РФ выше 70° северной широты достаточно суровы, с трудно прогнозируемой погодой даже на краткосрочный период, что не позволяет обеспечить нормальные условия эксплуатации «большой» авиации в этих районах. В тоже время, принятая Указом Президентом России В.В. Путиным за № 645 от 26.10.2020 г. «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.», ставит глобальные задачи по созданию нормальных условий функционирования в Арктике и на всём протяжении Северного морского пути во всех сферах жизнедеятельности в круглогодичный период.

Среди большого числа указанных задач в «Стратегической программе» содержится указание на необходимость разработки новых материалов, новой авиационной техники, разработки и внедрения новых инженерно-технических решений, обеспечивающих их устойчивое функционирование в условиях климатических изменений Арктики.

Из указанных программных материалов следует, что значительную роль в освоении Арктической зоны страны будут также играть и БПЛА, поскольку их эксплуатация возможна круглогодично; она не связана с наземной инфраструктурой, экономически существенно выгоднее и, что не менее важно, не связана с безопасностью экипажей пилотируемых ЛА.

Учитывая, что Арктика имеет для России экономически и стратегически важное значение, обеспечение надёжной эксплуатации рассматриваемого вида аппаратов в условиях сурового арктического климата при экстремально низких температурах является первостепенной проблемной задачей, требующей решения, в частности, разработки конструкции для обеспечения эффективной теплоизоляции основных агрегатов и систем БПЛА, эксплуатируемых в таких условиях круглогодично.

Чтобы обеспечить эксплуатационную температуру на борту летального аппарата в условиях экстремально низких температурных воздействий, существует большое разнообразие конструкторских и инженерных решений. Например, задачу по поддержанию эксплуатационной

температуры на борту ЛА решают путём использования систем термостатирования. Кроме того, проводятся работы по исследованию и созданию новых материалов и конструкций, обеспечивающих требуемую эксплуатационную температуру летательного аппарата или его агрегатов, находящихся в условиях экстремальных температурных режимов. Теплоизоляция в таких конструкциях достигается путём введения различных схем армирования, дисперсности материалов, а также структуры построения материалов в теплоизоляционной конструкции.

Для работ, проводимых при экстремально низких температурах, использование теплоизоляционных конструкций для БПЛА малоприспособно, поскольку конструкции таких систем имеют большую массу и вызывают проблемы технической реализации на борту аппарата. Кроме того, такие системы термостатирования требуют дополнительного подвода энергии, что усложняет конструкцию и дополнительно увеличивает массу. Поэтому современные системы термостатирования и конструкции в авиатехнике строятся на основе теплоизоляционных материалов и конструкций, которые уменьшают энергетические затраты на обогрев аппарата или его бортового оборудования. Вопросы построения оптимальных систем термостатирования имеют также большое значение и для конструкций космических аппаратов.

Проводимые в диссертации исследования отражают разработку средств теплоизоляции, которые позволяют обеспечить увеличение длительности эксплуатации агрегатов и бортового оборудования аппарата при низких арктических температурах. В случае необходимости обогрева борта обеспечивается минимальное потребление энергии благодаря улучшению теплоизоляционных свойств конструкции. Таким образом предоставляется возможность широкого использования БПЛА во многих случаях, заменяя в соответствующих операциях другие виды авиационной техники.

Степень разработанности темы исследования

Результаты фундаментальных исследований теплового проектирования летательных аппаратов приведены в монографиях Авдеевского В.С., Каблова Е.Н., Алифанова О. М., Дульнева Г.Н., Ненарокова А.В., Кудрявцевой Н.С., Зарубина В.С. и др.

Указанное актуальное направление развивалась в работах Каблова Е.Н., Алифанова О. М., Ненарокова А.В., Дульнева Г.Н. и др.

Данная диссертационная работа является продолжением и развитием разработок методик проектирования и создания эффективных теплоизоляционных конструкций.

Недостаточно изученными остались вопросы проектного формирования и создания эффективных теплоизоляционных конструкций с задаваемыми ограничениями по геометрическим и массогабаритным

параметрам в соответствии с компоновкой конструкций и элементов летательных аппаратов.

Целью диссертационной работы является формирование проектно-конструкторских решений по созданию средств теплоизоляции для функционирования беспилотных летательных аппаратов в экстремальных температурных условиях Арктики.

Решаются следующие научные **задачи**:

- определение необходимых теплофизических характеристик материалов для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций;

- определение необходимого распределения материалов в конструкции, для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций;

- определение необходимой структуры распределения материалов в конструкции, для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций;

- определение конструктивной компоновки БПЛА, обеспечивающей эффективные показатели теплоизоляции;

- проектное формирование теплоизоляционной конструкции по установленным принципам получения эффективных показателей теплоизоляции;

- верификация установленных принципов для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций, путем проведения климатических испытаний над экспериментальными образцами конструкции.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Определены основные новые принципы проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций в условиях ограничений по геометрическим и массогабаритным параметрам в соответствии с компоновкой конструкций и элементов беспилотных летательных аппаратов;

2. Предложена новая теплоизоляционная конструкция, построенная на принципах проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций, обеспечивающая конструктивные и эксплуатационные параметры беспилотного летательного аппарата, функционирующего в низких температурных условиях;

3. Экспериментальными исследованиями доказаны установленные принципы проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций для применения в беспилотных летательных аппаратах.

Теоретическая значимость работы состоит в определении новых принципов проектирования и создания эффективных теплоизоляционных конструкций в условиях ограничений по геометрическим и массогабаритным

параметрам в соответствии с компоновкой конструкций и элементов летательных аппаратов.

Практическая значимость диссертационной работы

Результаты диссертационной работы определяют практические направления по созданию эффективной теплоизоляционной конструкции с оптимальными параметрами. Также результаты диссертационной работы имеют значимость в проектировании и проведении научно-исследовательских и поисковых работ при создании новых образцов конструкций для использования в авиатехнике.

Методы исследования. Исследования теплообмена в теплоизоляционных конструкциях и материалах, по сформулированным краевым задачам, с соответствующими начальными и граничными условиями, осуществляются численно методом конечных разностей.

Экспериментальные исследования выполнены методами:

- испытание моделей конструкций на воздействие верхнего значения температуры среды при эксплуатации;
- испытание моделей конструкций на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Принципы проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций в условиях ограничений по геометрическим и массогабаритным параметрам в соответствии с компоновкой конструкций и элементов беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в низкотемпературных условиях.

2. Предлагаемая теплоизоляционная конструкция, обеспечивающая конструктивные и эксплуатационные параметры беспилотного летательного аппарата, функционирующего в низких температурных условиях.

3. Результаты экспериментальных исследований образцов конструкций, подтверждающих установленные принципы построения эффективных теплоизоляционных конструкций.

Достоверность результатов теоретических исследований обеспечивается использованием известных методов решений задач теплопроводности в конструкциях, материалах и теплообмена в газах и жидкостях, участвующих в конструкциях. Теоретические исследования дополнялись экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием сертифицированной метрологической аппаратуры, предназначенной для проведения термических испытаний.

Апробация основных результатов работы

Основные положения и результаты доложены и обсуждены:

– на международной конференции «Космические системы» (2021 г., г. Москва, МАИ (НИУ)),

– на XLVI международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2020» (2020 г., г. Москва, МАИ (НИУ)),

– на XI Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (2019 г., г. Москва, МАИ (НИУ)),

– на X Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (2019 г., г. Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова),

– на XLV международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2019» (2019 г., г. Москва, МАИ (НИУ)).

Содержание диссертации изложено в одиннадцати публикациях, в том числе – в шести рецензируемых научных изданиях Перечня ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 137 страницах текста, содержит 69 рисунков, 28 таблиц и 94 наименования литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведена оценка степени разработанности исследования, сформулирована цель исследования, показана её новизна, обоснованы оценки практической значимости работы, излагаются выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проводилось формирование задач проектно-конструкторских решений по созданию средств теплоизоляции для БПЛА, по следующим условиям:

1. Условия температурного воздействия на БПЛА;
2. Виды температурного воздействия на БПЛА;
3. Влияние температуры на элементы конструкций и агрегатов БПЛА;
4. Способы поддержания эксплуатационной температуры на борту БПЛА.

Во второй главе определялись основные принципы проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций по проведенным исследованиям:

– повышения теплоизоляционных свойств разрабатываемых конструкций по теплофизическим характеристикам материалов;

– повышения теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой;

- повышения теплоизоляционных свойств теплоизоляционных конструкций по структуре распределения материалов;
- повышения теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА по конструктиву.

Для повышения теплоизоляционных свойств разрабатываемых конструкций по теплофизическим характеристикам материалов проводились исследования теплопроводности материалов с различными теплофизическими характеристиками, представленными в Таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные задачи зависимости плотности и коэффициента теплопроводности на теплопроводность материала

| Материал № | Параметры теплопроводности | | | | |
|------------|--|--------------------------------------|--|---|---------------------|
| | Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С) | Плотность ρ , кг/м ³ | Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·°С) | Коэффициент температуропроводности, a , м ² /с | |
| 1 | λ_{\max} | ρ_{\min} | const | $1 \cdot 10^{-3}$ | |
| 2 | $\lambda_1 < \lambda_{\max}$ | | | $5 \cdot 10^{-4}$ | |
| 3 | $\lambda_2 < \lambda_1$ | | | $5 \cdot 10^{-5}$ | |
| 4 | $\lambda_{\min} < \lambda_2$ | | | $5 \cdot 10^{-6}$ | |
| 5 | | | | $\rho_1 > \rho_{\min}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| 6 | | | | $\rho_2 > \rho_1$ | $1.6 \cdot 10^{-7}$ |
| 7 | | | | $\rho_{\max} > \rho_2$ | $1 \cdot 10^{-7}$ |

Для исследования принципов повышения теплоизоляционных свойств материалов, при условии характеристик теплопроводности материалов, указанных в Таблице 1, рассмотрена математическая постановка задачи теплопроводности материалов в безразмерных переменных, которая в полном объеме представлена в диссертационной работе. Область решения данной задачи представлена на Рисунке 1.

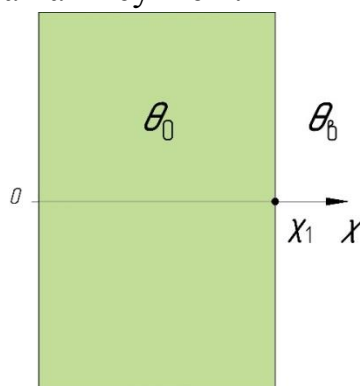


Рисунок 1 – Область решения задачи

Краевая задача для уравнения теплопроводности с учетом заданных начальных и граничных условий решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы.

Результаты исследования теплопроводности материала представлены на Рисунке 2.

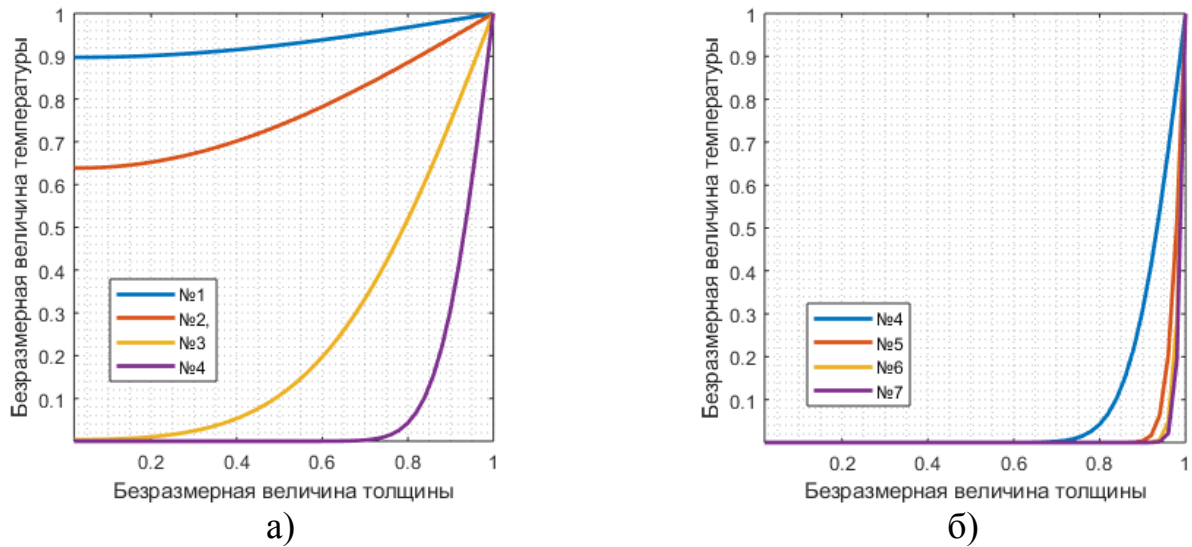


Рисунок 2 – Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии температуры, где: а) условие $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ (материалы №1-4); б) условие $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$ (материалы №5-7)

В случае воздействия конвекции на материалы результаты исследования будут иметь зависимости, представленные на Рисунке 3.

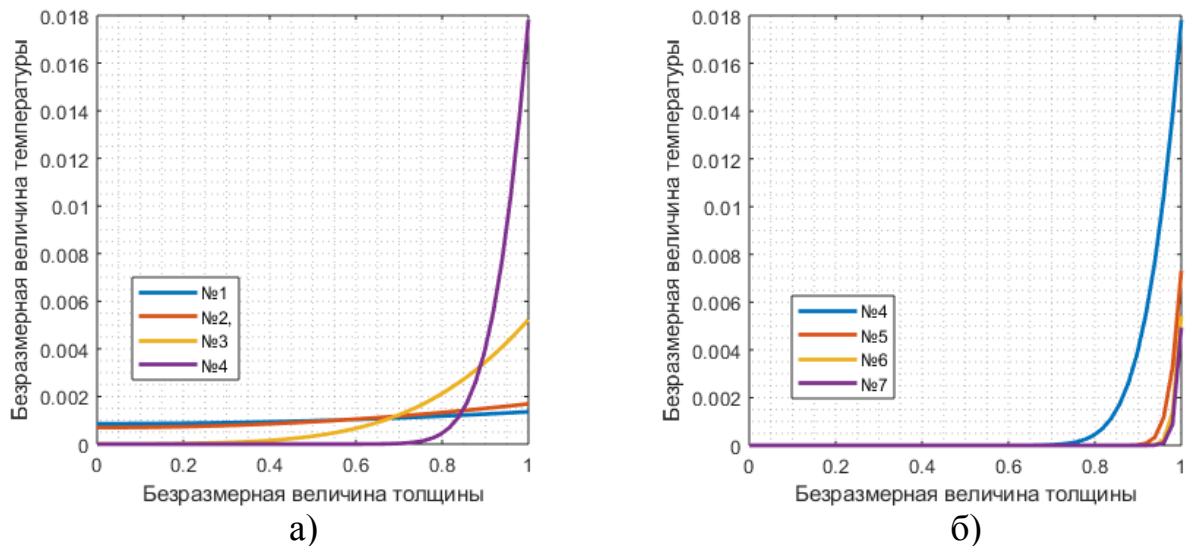


Рисунок 3 – Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии конвекции, где: а) условие $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ (материалы №1-4); б) условие $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$ (материалы №5-7)

Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии температуры и конвекции показывают, что эффективными теплоизоляционными показателями обладает материал №4, что является предсказуемым результатом, поскольку материал обладает наименьшим коэффициентом теплопроводности в отличие от материалов №1-3. Но

наиболее эффективными теплоизоляционными свойствами обладает материал №7. Данный материал имеет большое отношение между плотностью и коэффициентом теплопроводности. То есть материал имеет большое отношение между плотностью и коэффициентом теплопроводности. Следует отметить, что материалы №4, имеющие минимальные показатели коэффициента теплопроводности уступают материалам №5-7, хотя параметр λ_{\min} для этих материалов задаётся одинаковым.

Для определения повышенных теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой проводились исследования теплопроводности элементов конструкций с различными подборками материалов, взаимодействующие между собой в элементе конструкции, которые представлены в Таблице 2 и Рисунке 4.

Таблица 2 – Коэффициент температуропроводности материалов в зависимости от их распределения в элементе

| Элементы № | Значение коэффициента температуропроводности a в зависимости от координат, м ² /с | | | |
|------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| | от 0 до x_1 | от x_1 до x_2 | от x_2 до x_3 | от x_3 до x_4 |
| 1 | $a_1 = 1 \cdot 10^{-7}$ | | | |
| 2 | a_1 | a_2 | a_1 | a_2 |
| 3 | $a_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ | a_1 | a_2 | a_1 |

Математическая постановка задачи данного исследования, в полном объёме представлена в диссертационной работе. Область решения данной задачи представлена на Рисунке 4.

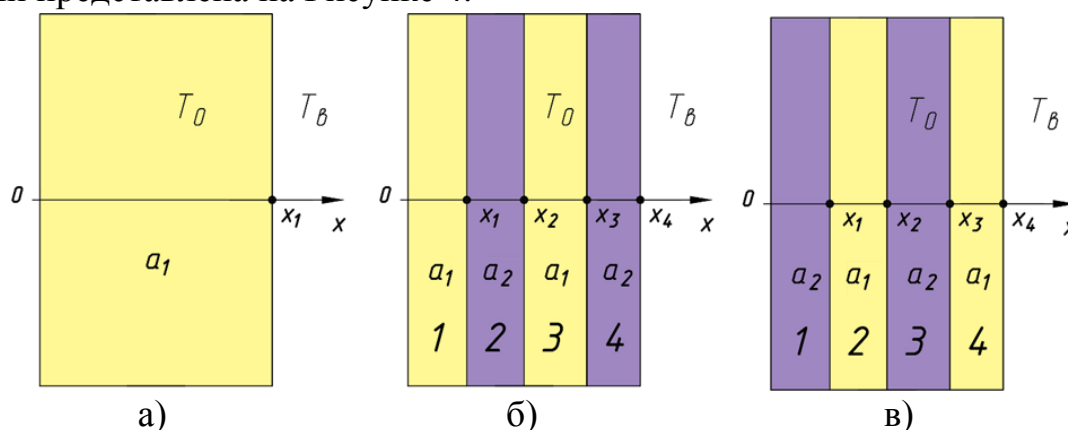


Рисунок 4 – Область решения задачи для элементов, где: а) №1; б) №2; в) №3

Краевая задача для уравнений теплопроводности элементов конструкций с учетом заданных начальных и граничных условий решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы.

Результаты исследования теплопроводности элементов конструкций представлены на Рисунке 5.

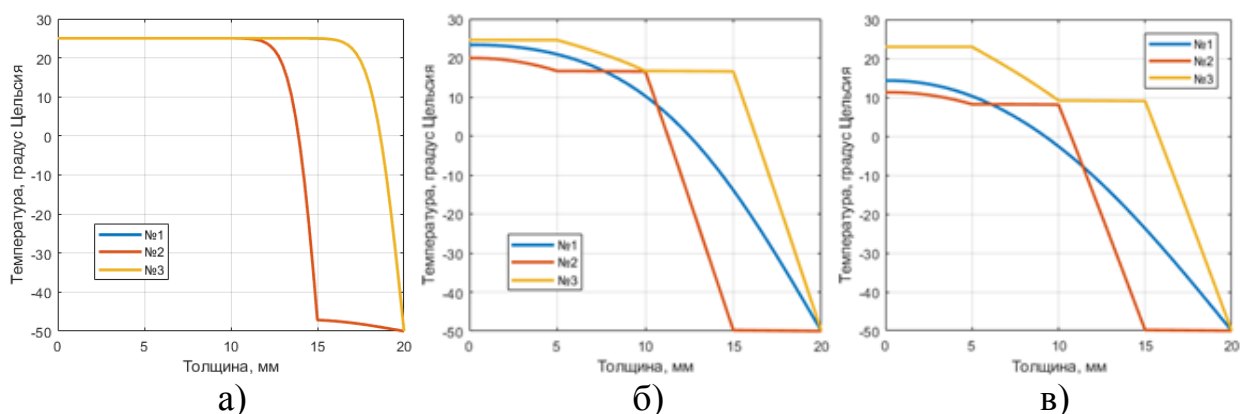


Рисунок 5 – Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры: а) 10 с; б) 300 с; в) 600 с

В случае воздействия конвекции на элементы конструкций результаты исследования будут иметь зависимости, представленные на Рисунке 6.

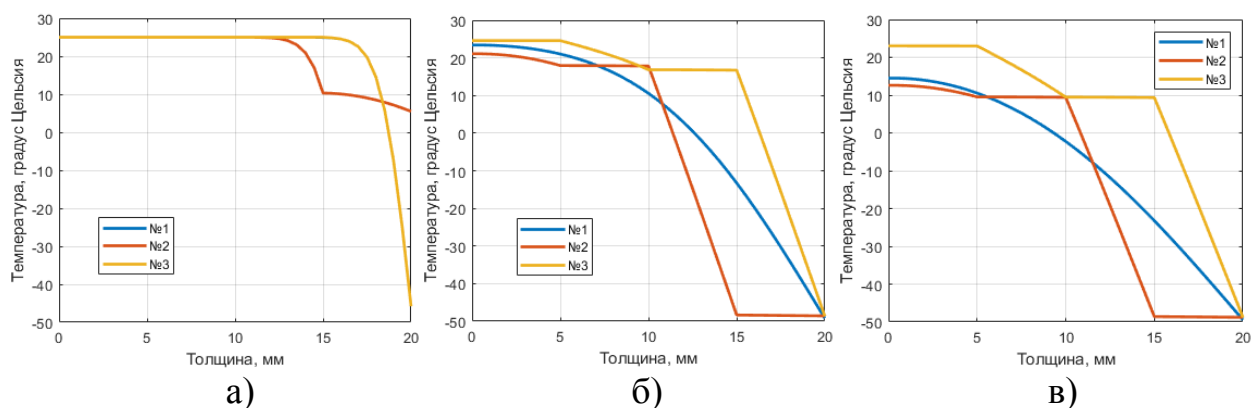


Рисунок 6 – Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии конвекции: а) 10 с; б) 300 с; в) 600 с

Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры и конвекции показывают, что элемент №3 имеет более высокие показатели теплоизоляции по сравнению с элементами №1 и №2. Преимущество показателя термоизоляции элемента №3 в 1.7-1.3 раза от элементов №1 и №2. Элемент №2 имеет низкий показатель теплоизоляции в отличии от элемента №3 в следствии того, что задаваемая температура T_b приходится на материал с высокими показателями теплопроводности. Следует отметить, что показатели однородного элемента №1 (материала №7 предыдущего исследования) по результатам предыдущего исследования имеет лучшие показатели теплоизоляции, но в случае с элементом №3 и №2 проигрывает по показателям теплопроводности, хотя суммарный коэффициент температуропроводности элементов №3 и №2 больше, чем у элемента №1 (материала №7 предыдущего исследования).

Для определения повышенных теплоизоляционных свойств теплоизоляционных конструкций по структуре распределения материалов

проводились исследования теплопроводности элементов конструкций с различной геометрией распределения материалов в элементе конструкции, представленные на Рисунке 7. Теплофизические характеристики материалов представлены в Таблице 2.

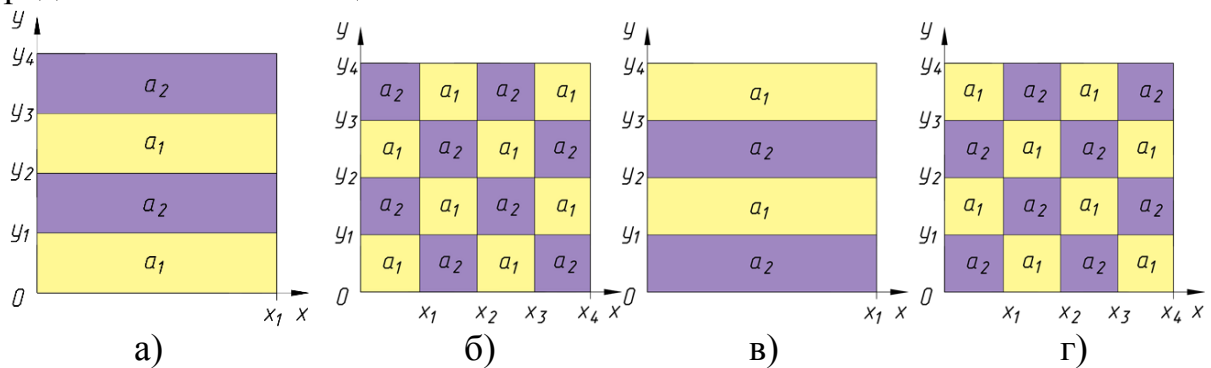
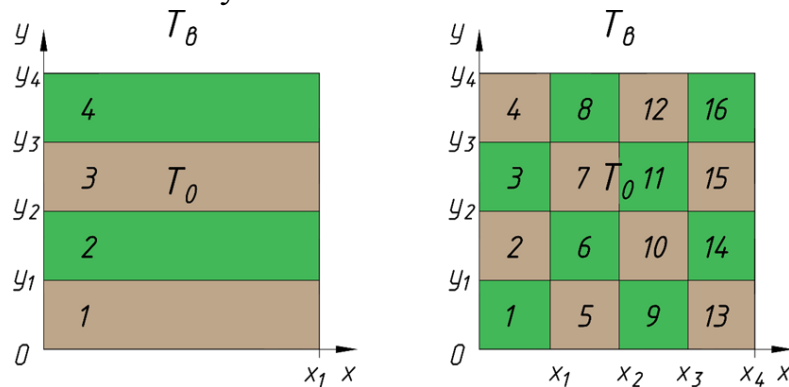


Рисунок 7 – Распределение материалов в элементах: а) №1; б) №2; в) №3; г) №4

Математическая постановка задачи данного исследования, в полном объеме представлена в диссертационной работе. Область решения данной задачи представлена на Рисунке 8.



Краевая задача для систем уравнений теплопроводности элементов конструкции с учетом заданных граничных и начальных условий решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для систем уравнений применялась локально-одномерная схема Самарского.

Результаты исследования теплопроводности элементов конструкций представлены на Рисунке 9 и 10.

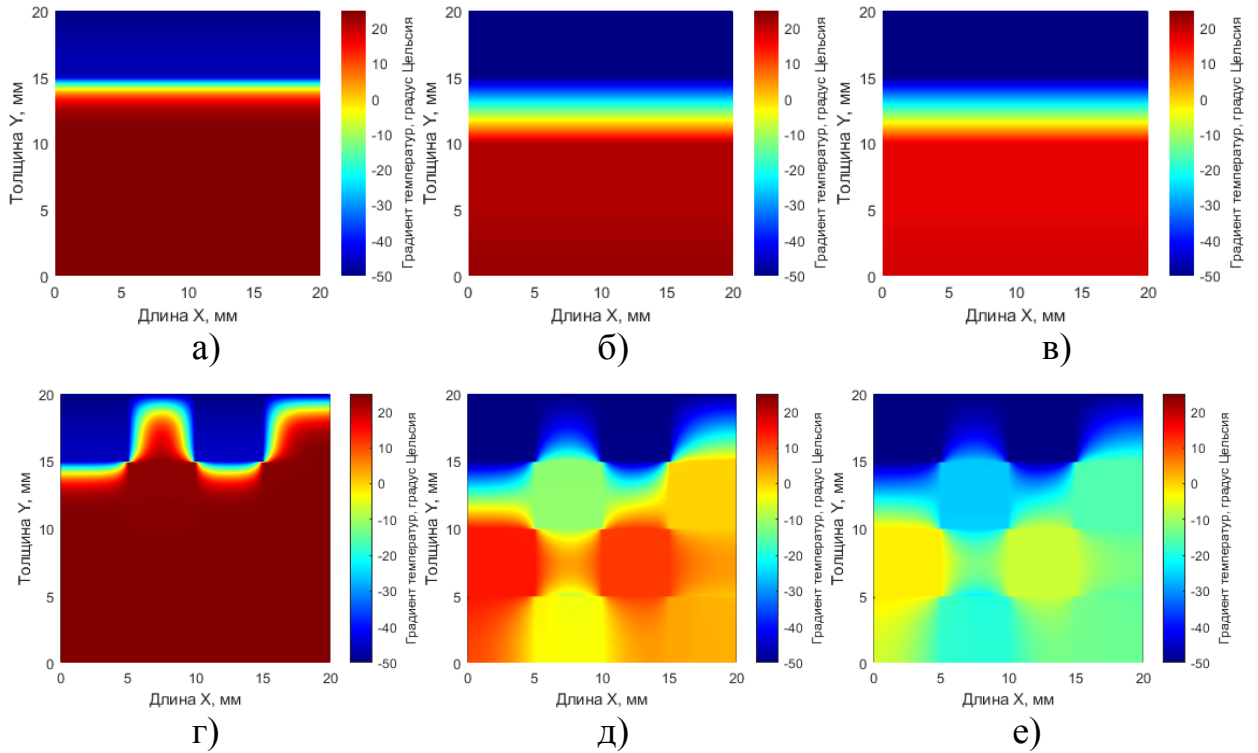


Рисунок 9 – Результаты исследования теплопроводности элементов №1, №2 за время воздействия температуры: а), г) 10 с; б), д) 300 с; в), е) 600 с

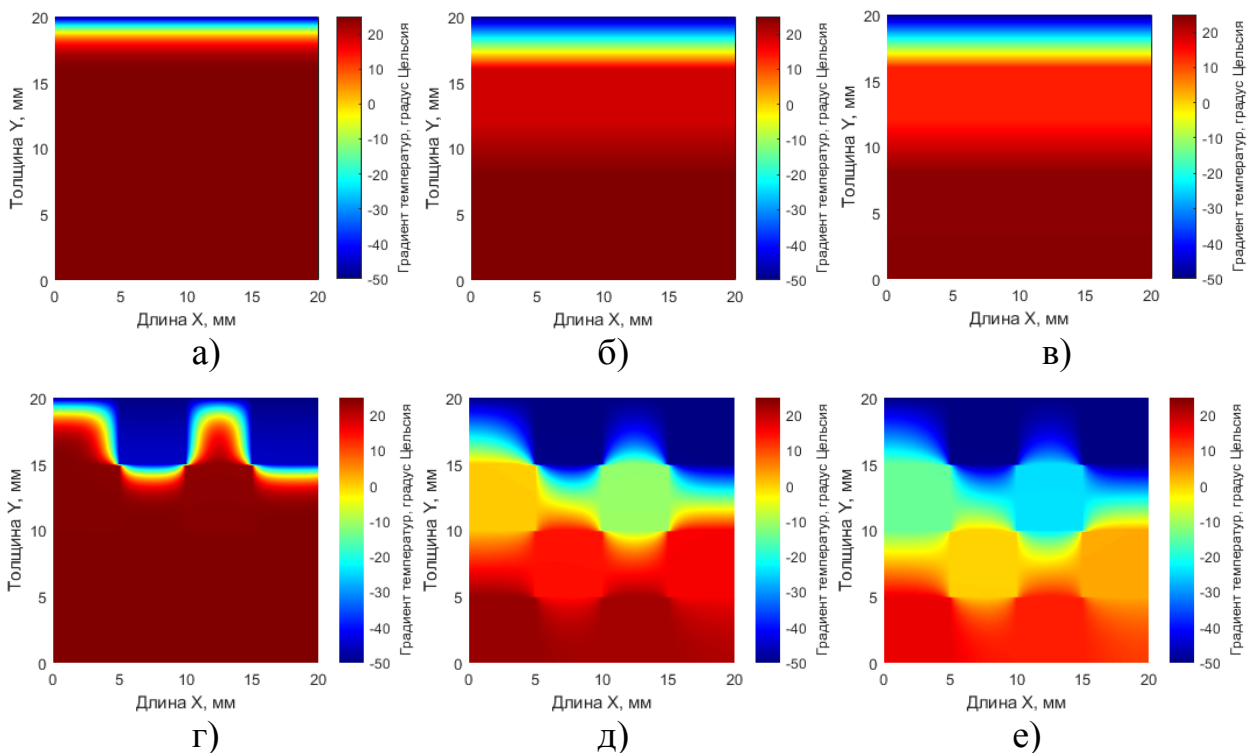


Рисунок 10 – Результаты исследования теплопроводности элементов №3, №4 за время воздействия температуры: а), г) 10 с; б), д) 300 с; в), е) 600 с

Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры, показывают, что в обоих случаях элементы с

распределением материалов по слоям имеют большее преимущество в теплоизоляции, чем элементы с шахматным распределением материал по слоям. Так элемент №2 на границе $y = 0$ имеет температуру равную от -6 до -14°C , что в $4 - 3,2$ элемента №1. Элемент №4 на границе $y = 0$ имеет температуру равную от 16 до 11°C , что в $1,5 - 2$ меньше элемента №3.

Поскольку объектом исследования является БПЛА, то необходимо рассмотреть варианты компоновки БПЛА, обеспечивающие его высокие показатели теплоизоляции. Для решения данного вопроса проведём исследование теплообмена сечения БПЛА с вариацией занимаемых площадей техники и газа в корпусе БПЛА. Постановка задачи представлена на Рисунке 11.

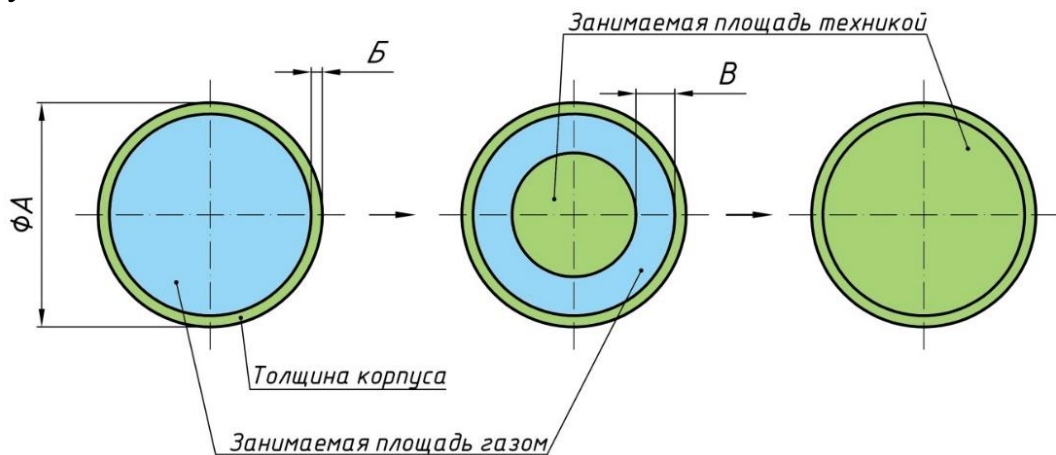


Рисунок 11 – Постановка задачи с вариацией занимаемых площадей и габаритными размерами

Для сечения диаметром 100 мм размер B варьируется от 0 до 47 мм. Для сечения диаметром 200 мм размер B варьируется от 0 до 97 мм. Для сечения диаметром 300 мм размер B варьируется от 0 до 147 мм. Для сечения диаметром 500 мм размер B варьируется от 0 до 247 мм. Размер B для всех диаметров сечений постоянен и равен 3 мм.

Математическая постановка задачи данного исследования, в полном объёме представлена в диссертационной работе. Область решения данной задачи представлена на Рисунке 12.

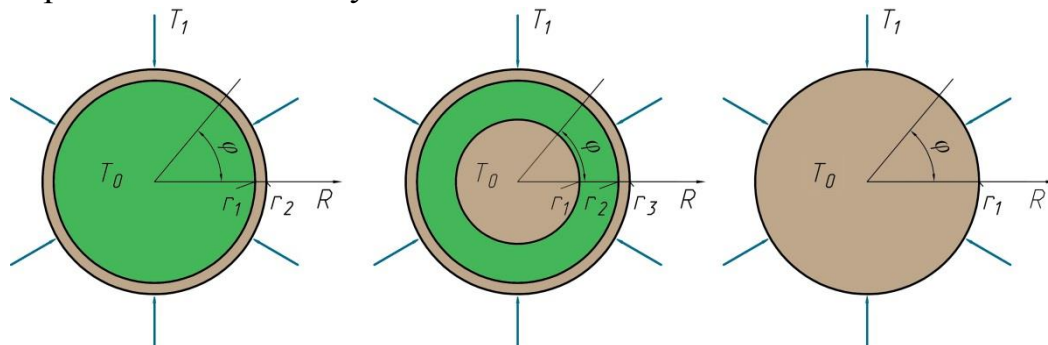


Рисунок 12 – Область решения задачи

Краевая задача для систем уравнений с учетом заданных начальных и граничных условий решались конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы. Для численного решения краевой задачи для систем уравнений применялась локально-одномерная схема Самарского.

Результаты исследований теплообмена рассматриваемых сечений БПЛА представлены на Рисунках 13 и 14.

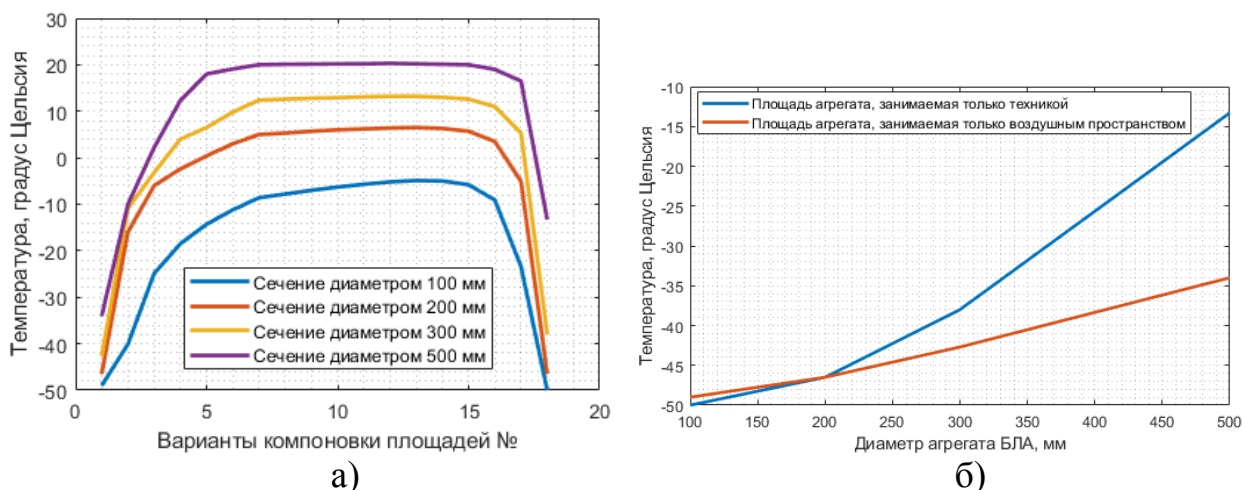


Рисунок 13 – Значение возникающих температур в агрегате БПЛА: а) в зависимости от его компоновки; б) зависимости от его диаметра

Результаты исследования теплообмена рассматриваемых сечений БПЛА показывают, что для сечения диаметром 100 мм максимальное значение температуры (минус 5 °С), возникает при толщинах занимаемым газом 6-10 мм. Для сечения диаметром 200 мм максимальное значение температуры (плюс 6°С), возникает при толщинах, занимаемых газом 6-12 мм. Для сечения диаметром 300 мм максимальное значение температуры (плюс 13°С), возникает при толщинах, занимаемых газом 6-14 мм. Для сечения диаметром 500 мм максимальное значение температуры (плюс 20°С), возникает при толщинах, занимаемых газом 6-20 мм. Показатели теплоизоляции агрегата, где площадь сечения занимает воздушное пространство, падают с увеличением диаметра агрегата относительно агрегата с сечением, занимаемым техникой, начиная с агрегата диаметром 200 мм.

В третьей главе на основе принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций, описание которых изложено во второй главе диссертационной работы, проводятся теоретические исследования формирования теплоизоляционной конструкции малой толщины, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции, методом

проектирования. Теплоизоляционная конструкция диссертационной работы представлена на Рисунке 14.

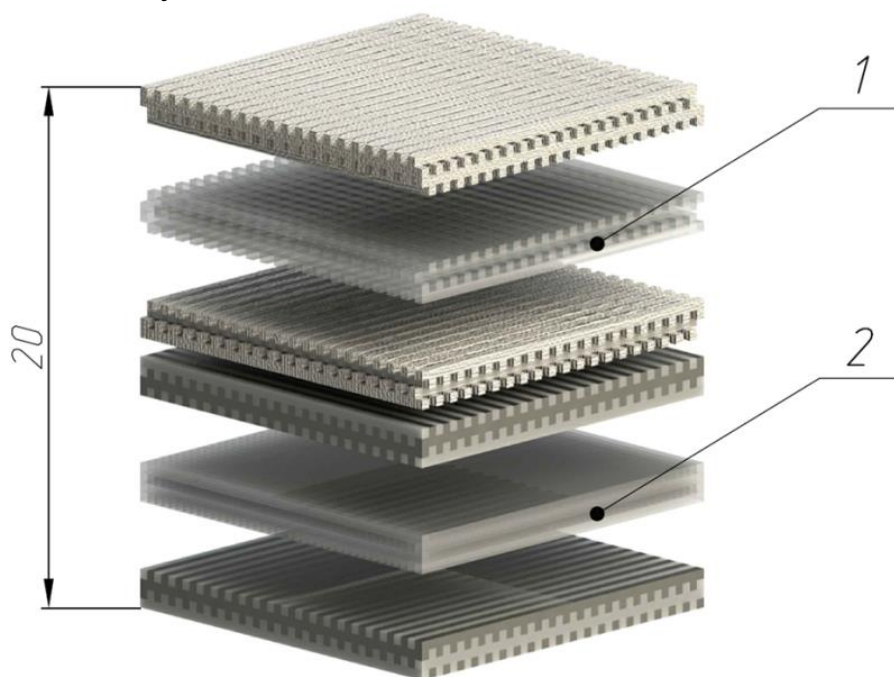


Рисунок 14 – Спроектированная термоизоляционная конструкция

Теплоизоляционная конструкция диссертационной работы является многослойной, содержащая слои материалов стекловолокна 1 и металлической тканой сетки 2 поверхность и открытые участки сетки, которой покрываются герметикам.

В предлагаемой теплоизоляционной конструкции рассматриваются материалы с двунаправленной прямоугольной схемой армирования, которая дает возможность вариации теплофизических характеристик материалов, участвующих в конструкции.

Для проведения сравнительного анализа предлагаемой теплоизоляционной конструкции с используемыми в авиастроении рассмотрим преимущества и недостатки конструкций, произведя исследования теплопроводности при двух условиях:

1) Исследования теплопроводности конструкций при постоянной толщине.

2) Исследования теплопроводности конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой теплоизоляционной конструкции.

В качестве аналогов используемых теплоизоляционных конструкций рассматриваются материалы с физическими свойствами, представленными в Таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики теплоизоляционных материалов

| Материал | № | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) | Плотность, кг/м ² |
|---------------------------|----|---|------------------------------|
| Минеральная вата | 1 | 0,038 | 35 |
| | 2 | 0,045 | 160 |
| Стекловата | 3 | 0,037 | 13 |
| | 4 | 0,046 | 85 |
| Вспененный пенополистирол | 5 | 0,03 | 15 |
| | 6 | 0,04 | 40 |
| Пенополиуретан | 7 | 0,03 | 30 |
| | 8 | 0,04 | 200 |
| Аэрогель | 9 | 0,022 | 180 |
| | 10 | 0,014 | 110 |

Результаты исследования теплопроводности конструкций при постоянной толщине представлены на Рисунке 15.

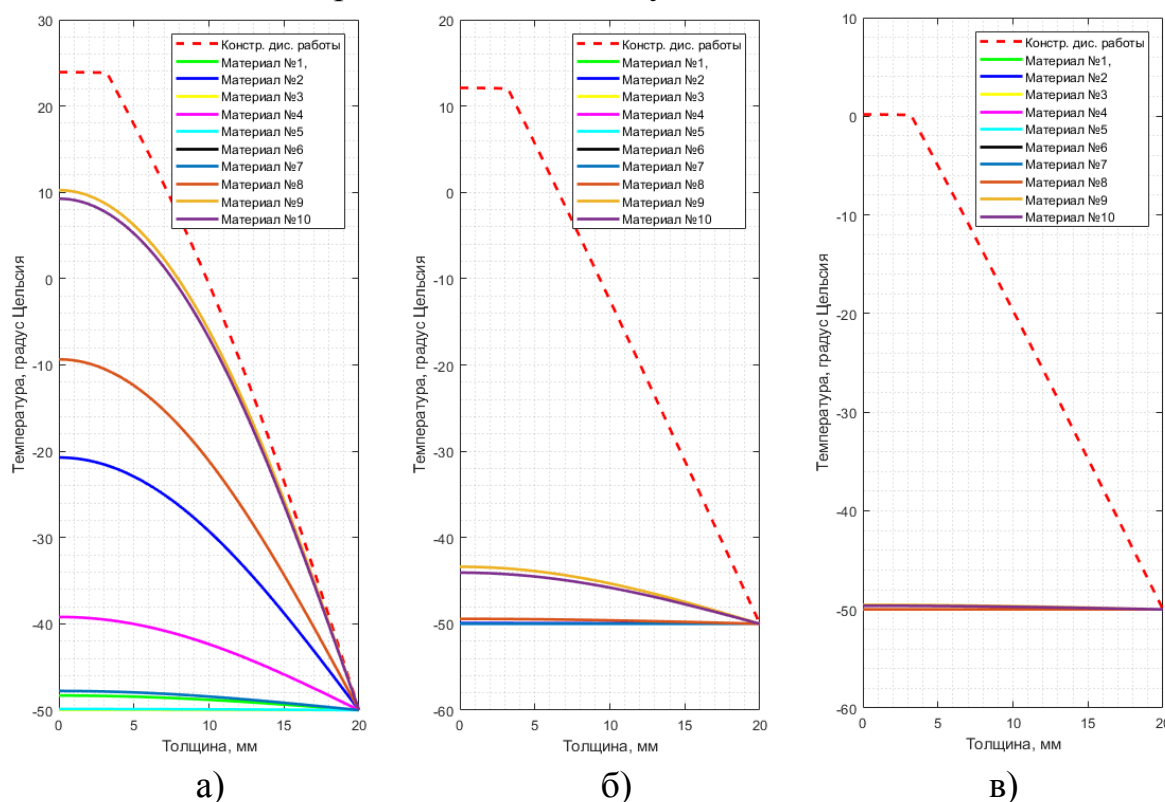


Рисунок 15 – Результаты исследования теплопроводности при временном воздействии: а) 10 мин; б) 1 час; г) 2 часа

Результаты исследования теплопроводности конструкций с постоянными толщинами при воздействии вынужденной конвекции при температуре внешней среды равной минус 50°С показывают, что наиболее высокие показатели теплоизоляции имеет предлагаемая конструкция. Температура данной конструкции за время 2 часа опустилась от плюс 25°С до плюс 0,1°С. У всех остальных конструкций с материалами №1-10 температура опустилась за время 2 часа до минус 50°С.

Результаты исследования теплопроводности конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой конструкции, представлены на Рисунке 16 и 17.

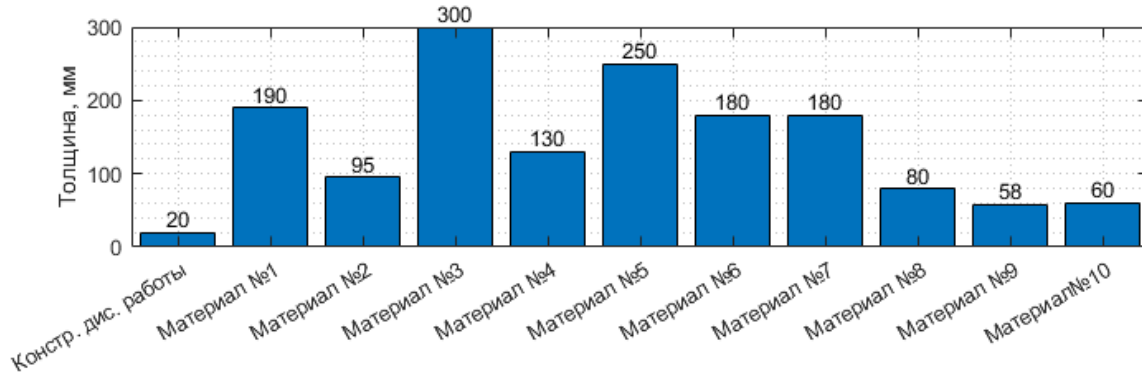


Рисунок 16 – Результаты исследования теплопроводности конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой конструкции

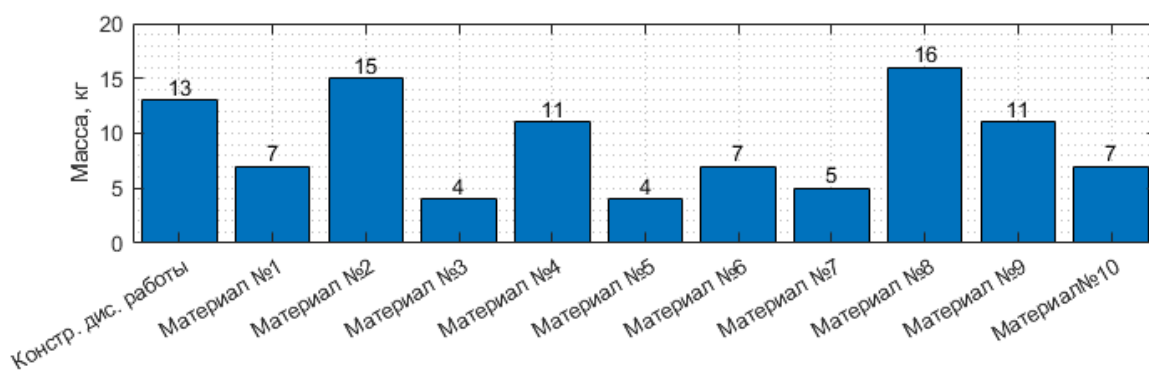


Рисунок 17 – Масса конструкций на 1 м^2 при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой конструкции

Результаты исследований показывают, что наибольшую толщину, необходимую для получения показателей теплопроводности предлагаемой конструкции имеет конструкция с материалом №3 (стекловата малой плотностью), которая имеет значение толщины 300 мм. Наименьшую толщину, необходимую для получения показателей теплопроводности предлагаемой конструкции, имеют конструкции с материалами №8, 9 (аэрогели), которые имеют значения толщины 58 и 60 мм. То есть, предлагаемая конструкция имеет преимущество по малой толщине в 3 раза, но уступает по массе практически всем материалам кроме конструкций с материалами №2 (минеральная вата с большой плотностью) и №8 (пенополиуретан с большой плотностью).

Рассмотрим применение предлагаемой теплоизоляционной конструкции на агрегатах БПЛА с диаметрами 100, 200, 300, 500 мм, сечения которых представлены на Рисунках 18.

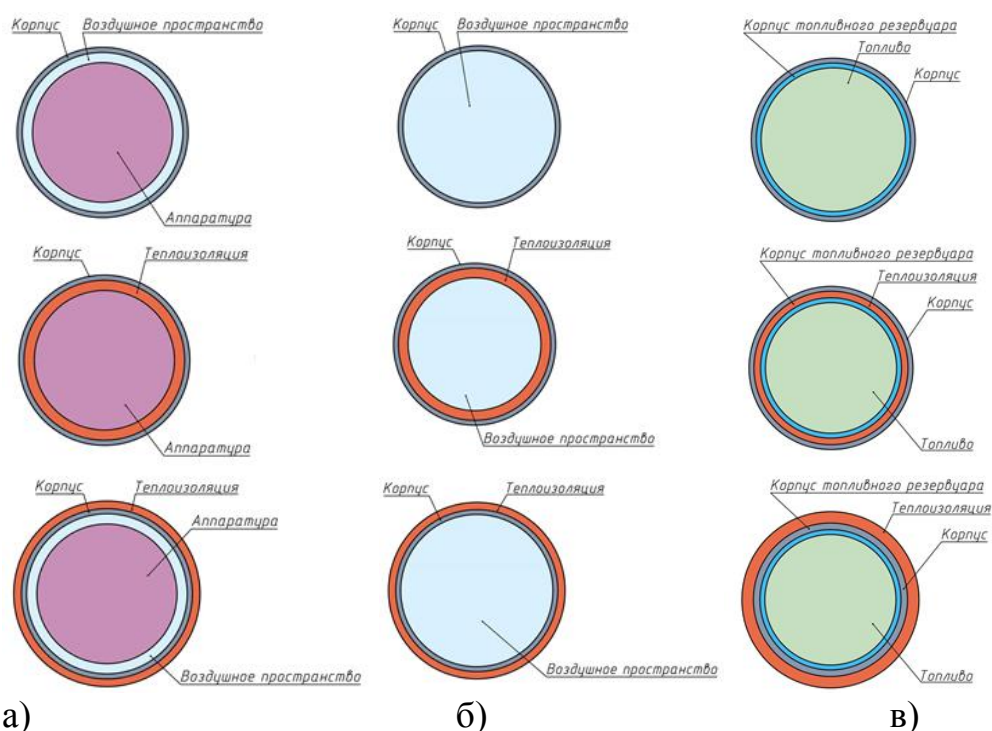


Рисунок 18 – Сечение агрегатов БПЛА: а) с размещенной техникой; б) с воздушным пространством; в) с топливным резервуаром

Материалы данного исследования, в полном объеме представлена в диссертационной работе.

Результаты исследования теплообмена в сечениях данных агрегатов при воздействиях, имитирующих условия полёта в арктической зоне, показывают, что наилучшие результаты теплоизоляции имеют агрегаты с внешней теплоизоляцией. Показатели теплоизоляции (время падения температуры агрегатов от 25 до 5°C) агрегатов с внешней теплоизоляцией превышают показатели агрегатов с внутренней теплоизоляцией в 1,5-2,5 раза, а показатели агрегата без теплоизоляции в 5-180 раз.

В качестве примера рассмотрим температурный градиент агрегатов БПЛА диаметром 300 мм, представленные на Рисунках 19-21.

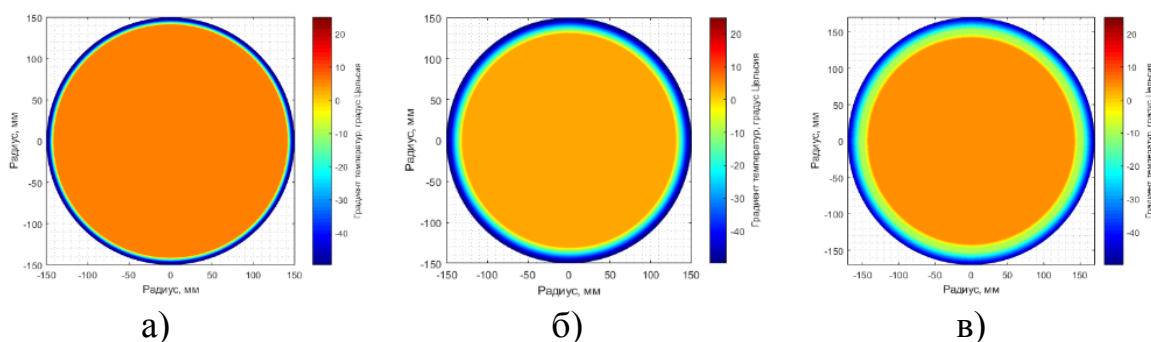


Рисунок 19 – Температура агрегата с размещенной техникой, где, временное воздействие отрицательной температуры в условиях полета БПЛА составляет: а) 8 часов без теплоизоляции; б) 24 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 34 часа с внешней теплоизоляцией

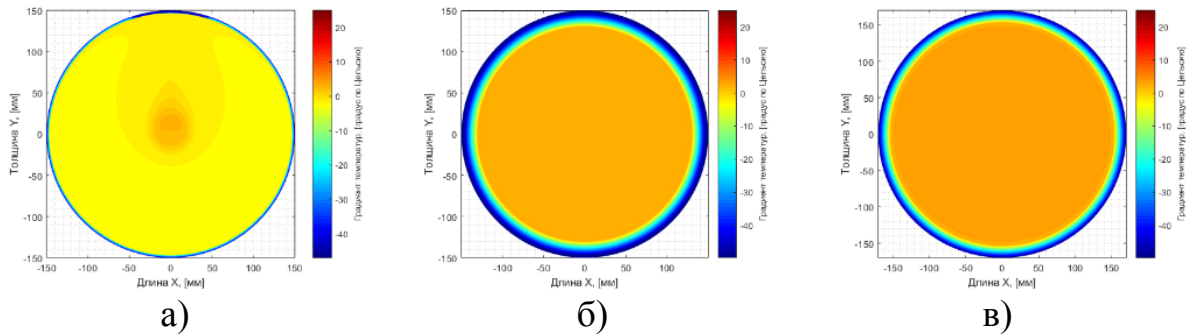


Рисунок 20 – Температура агрегата с воздушным пространством, где, временное воздействие отрицательной температуры в условиях полета БПЛА составляет: а) 2 мин без теплоизоляции; б) 4 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 4,5 часа с теплоизоляцией

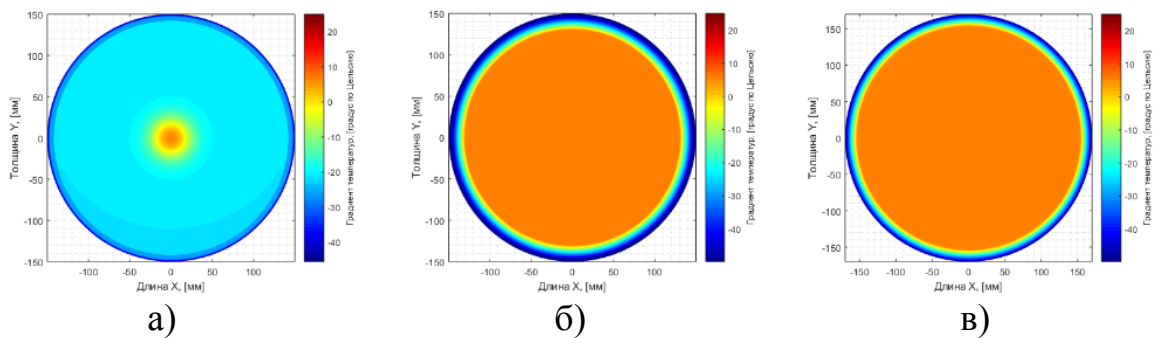


Рисунок 21 – Температура агрегата с топливным резервуаром, где, временное воздействие отрицательной температуры в условиях полета БПЛА составляет: а) 75 мин без теплоизоляции; б) 20 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 22 часа с внешней теплоизоляцией

В четвёртой главе проводится верификации установленных принципов для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций путем проведения климатических испытаний над экспериментальными образцами конструкции. Для этого проводятся экспериментальные и теоретические исследования конструкций и их сравнение друг с другом. Конструкция имеет вид, представленный на Рисунке 22.

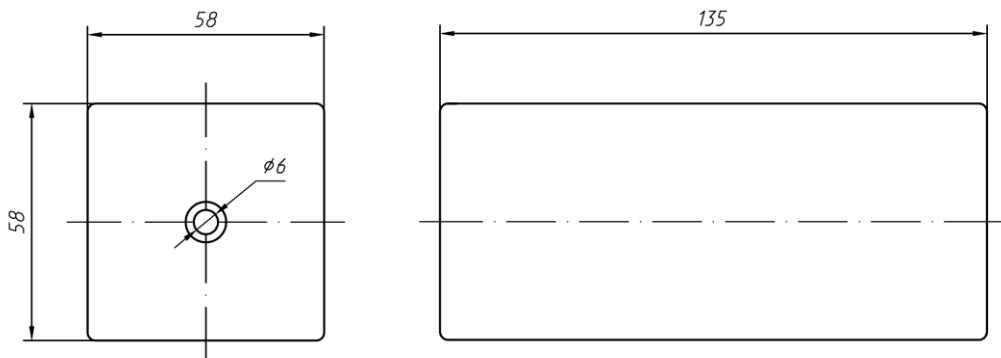


Рисунок 22 – Экспериментальный образец

Конструкция имеет два варианта исполнения теплоизоляционной обшивки, представленные на Рисунке 23.

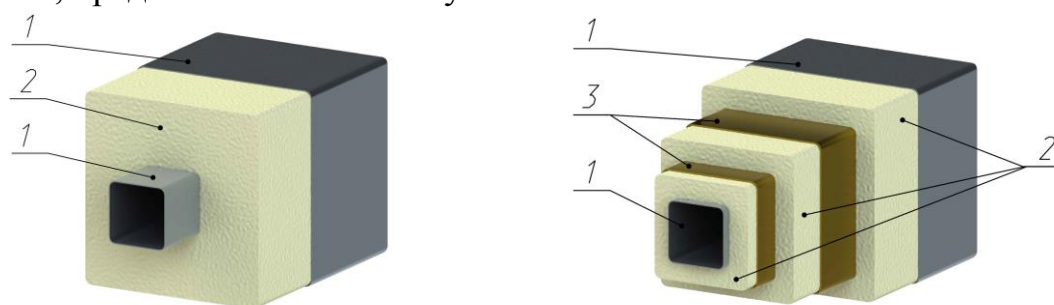


Рисунок 23 – Теплоизоляционная обшивка моделей в двух исполнениях, где: 1 – оцинкованная сталь; 2 – минеральная вата; 3 – латунь

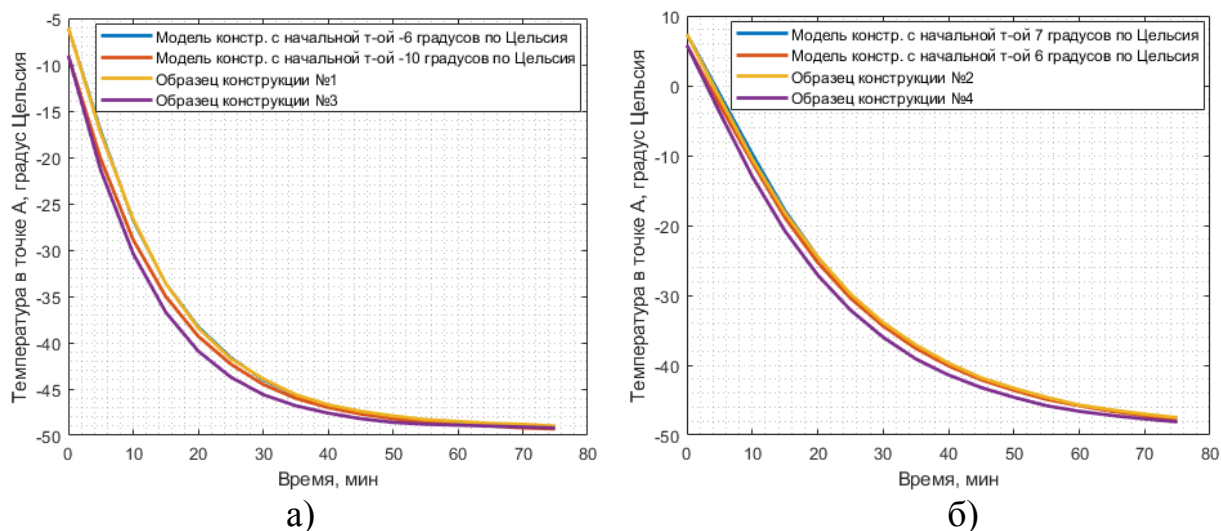
Экспериментальные образцы имеют два экземпляра, нумерация которых производится следующим образом:

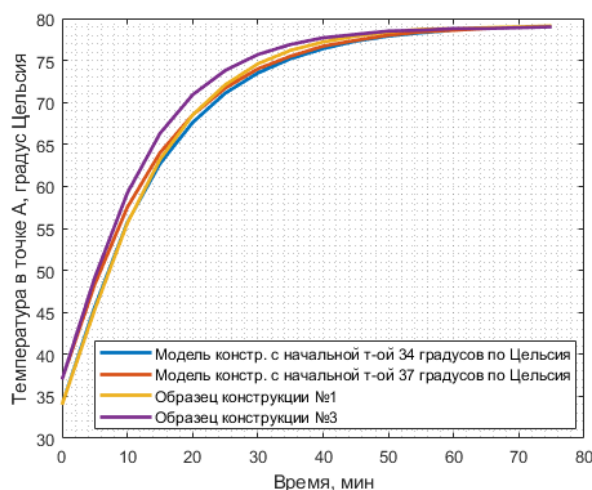
- Образцы №1, 3 – образцы с трёхслойной обшивкой (Рисунок 23);
- Образцы №2, 4 – образцы с семислойной обшивкой (Рисунок 23).

В теоретическом и экспериментальном исследованиях рассматриваются случаи воздействия температур воздуха внешней среды T_e равных минус 50°C и плюс 80°C . Воздействие температуры на экспериментальные образцы производилось климотермокамерой, где замеры температуры внутренней полости образцов снимались датчиками.

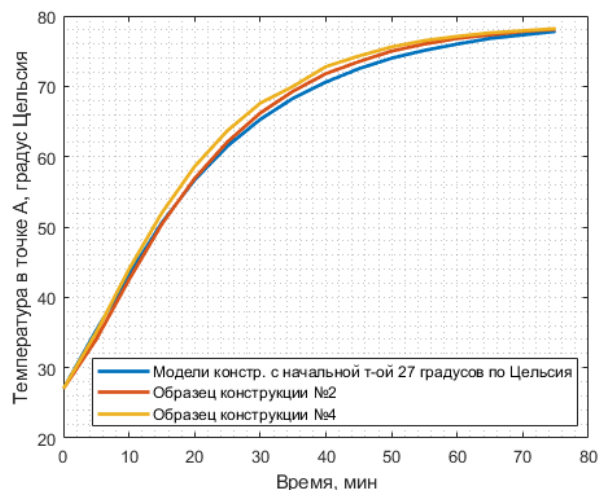
Материалы исследований образцов и моделей более подробно представлены в диссертационной работе.

Результаты исследований теплопроводности многослойных конструкций представлены на Рисунке 24, которые показывают, что максимальная общая погрешность между экспериментальными и теоретическими исследованиями составляет 5%, а минимальная 0,4%.





в)



г)

в) кривая температур образцов и моделей трехслойной конструкции при воздействии температуры плюс 80°C; г) кривая температур образцов и моделей трехслойной конструкции при воздействии температуры плюс 80°C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено формирование проектно-конструкторских решений по созданию средств теплоизоляции для функционирования беспилотных летательных аппаратов в экстремальных температурных условиях Арктики.

Основные новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по теплофизическим характеристикам материалов сопровождается использованием материалов, которые имеют не только низкий коэффициент теплопроводности, но и большую плотность. Причем, чем больше отношение показателя коэффициента теплопроводности материала к произведению удельной теплоемкости и плотности материала, тем выше показатели теплоизоляции материала;

2. Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой характеризуются введением слоев материалов с высокой плотностью. Причем, слой материала, на который непосредственно происходит воздействие температуры, должен иметь низкие показатели теплопроводности;

3. Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по структуре распределения материалов в конструкции характеризуются распределением материалов в конструкции по слоям в отличие от конструкций, где распределение материалов проводят по геометрической структуре;

4. Повышение теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА по их конструктиву, характеризуется конструктивной компоновкой агрегата БПЛА, в которой обеспечивается прослойка газа между корпусом и составными частями агрегата, в зависимости от диаметра агрегата БПЛА, толщина которой составляет от 6 до 20 мм;

5. По установленным принципам получения эффективных показателей теплоизоляции конструкции спроектирована предлагаемая теплоизоляционная конструкция, отвечающая требованиям эксплуатации в заданных температурных условиях и характеристик беспилотного летательного аппарата;

6. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают пригодность определяемых принципов формирования эффективных теплоизоляционных конструкций основанных на проведении теоретических исследований, рассматриваемых математических моделей процессов теплообмена различных конструкций и материалов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Решение комплексных задач проектирования – формирование математического и программного обеспечения проектирования теплоизоляционных конструкций в соответствии с техническими условиями эксплуатации различных летательных аппаратов при заданных ограничениях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах

1. Маскайкин В.А. Проектное формирование теплоизоляции для термостатирования элементов конструкций БПЛА, функционирующего в температурных условиях Арктики // Тепловые процессы в технике. – 2023. - Т. 15 - № 2. - С. 79-87.

2. Маскайкин В.А. Определение конструктивной компоновки БПЛА, обеспечивающей высокие показатели термоизоляции без применения термоизоляционных средств защиты // Вестник Московского авиационного института. – 2022. - Т. 29 - № 4. - С. 85-93.

3. Маскайкин В.А., Махров В.П. Исследование теплопроводности многослойной теплоизоляционной обшивки летательных аппаратов в условия полета // Вестник Московского авиационного института. 2021. - Т. 28 - № 4. - С. 118-130.

4. Маскайкин В.А., Махров В.П. Исследование конвективного теплообмена структурированного, неоднородного элемента, служащего как

теплоизоляционный слой обшивки авиационных изделий // Тепловые процессы в технике. – 2021. - Т. 13. - № 5. - С. 230-237.

5. Маскайкин В.А. Численный метод исследования температурных режимов неоднородного, структурированного тела // Труды МАИ. – 2020. - №115, (электронный журнал).

6. Маскайкин В.А. Теоретическое исследование температурных режимов при обтекании осесимметричных тел, транспортируемых на внешней подвеске летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2020. - №111, (электронный журнал).

Другие публикации

1. Маскайкин В.А., Махров В.П. К вопросу о выборе структуры теплозащитного материала аппарата, работающего в условиях экстремальных температур // в тезисах международной конференции «Космические системы» 27 апреля 2021 г. Москва. – МАИ. - С. 43.

2. Маскайкин В.А. Исследование пористой структуры теплоизоляционных материалов используемые в авиационной и ракетно-космической технике // в сборнике тезисов докладов XLVI Международной научной конференции «Гагаринские чтения - 2020» 12-16 апреля 2020 г. Москва. – МАИ. - С. 79.

3. Маскайкин В.А. Влияние температуры внешней среды на транспортировку спускаемых морских аппаратов воздушного базирования // в аннотациях конкурсных работ XI Всероссийского межотраслевого конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». 18-22 ноября 2019 г. Москва. - С. 50.

4. Маскайкин В.А. Концепция создания капсулы для транспортировки и доставки беспилотного подводного аппарата авиационной техникой в экстремальных погодных условиях // Сборник избранных научных докладов по итогам XLV международной научной конференции «Гагаринские чтения». – 2019. - С. 54-64.

5. Маскайкин В.А. Концепция создания капсулы для транспортировки и доставки беспилотного подводного аппарата авиационной техникой в экстремальных погодных условиях // в сборнике тезисов докладов XLV Международной научной конференции «Гагаринские чтения - 2019» 16-19 апреля 2019 г. Москва. – МАИ. - С. 567-568.