

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МАИ (НИУ)

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Махров Владислав Петрович

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ СРЕДСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ БПЛА..	11
1.1 Условия температурного воздействия на БПЛА	11
1.2 Виды температурного воздействия на БПЛА	16
1.3 Влияние температуры на элементы конструкций и агрегатов БПЛА ...	17
1.4 Современные средства термостатирования	19
Заключение по главе 1	25
ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	26
2.1 Математические модели, используемые в исследованиях определения принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций	26
2.2 Повышение теплоизоляционных свойств разрабатываемых конструкций по теплофизическим характеристикам материалов.	32
2.3 Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой.	37
2.4 Повышение теплоизоляционных свойств теплоизоляционных конструкций по структуре распределения материалов	44
2.5 Повышение теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА по конструктиву	55
Заключение по главе 2	61
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ БПЛА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	63
3.1 Концепция разработанной теплоизоляционной конструкции	63
3.2 Сравнительный анализ теплоизоляционных конструкций для применения в БПЛА	69

3.3 Теплоизоляционные показатели БПЛА с применением КТИ, формируемой на основе принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций.....	76
Заключение по главе 3	95
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ УСТАНОВЛЕННЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	97
4.1 Экспериментальное исследование теплообмена экспериментальных образцов	97
4.2 Теоретическое исследование теплообмена моделей экспериментальных конструкций.....	106
4.3 Сравнение теоретического и экспериментального исследования теплообмена многослойных конструкций.....	119
Заключение по главе 4.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128

ВВЕДЕНИЕ

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 большое значение, то 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, предоставляя 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.

ГЛАВА 1 ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ПРОЕКТНО- КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ СРЕДСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ БПЛА

1.1 Условия температурного воздействия на БПЛА

На БПЛА, как и на любой вид летательного аппарата, в условиях эксплуатации имеет место быть воздействие температуры. Условия, при котором возникают температуры, воздействующие на БПЛА, можно сформулировать по нескольким составляющим.

Одним из основных условий является климатические районы эксплуатации БПЛА. В диссертационной работе рассматривается вопрос применения БПЛА в климатических условиях Арктики. Анализ литературных источников [1-5], затрагивающих проблему сохранения эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях показывает, что в настоящее время отсутствует единая методика оценки эффективности функционирования БПЛА в арктической местности в соответствии с требованиями стандарта [6] и нормативных документов МЧС России и Минтранса РФ [7-8].

Арктическая зона составляет значительную часть территории Российской Федерации (Рисунок 1.1.1), которая имеет экстремально низкие значения температуры внешней среды. Температура воздуха, возникающая в данном регионе даже при среднесезонных показателях, имеет до минус 22°C, а абсолютный минимум температуры воздуха за год составляет минус 70°C.

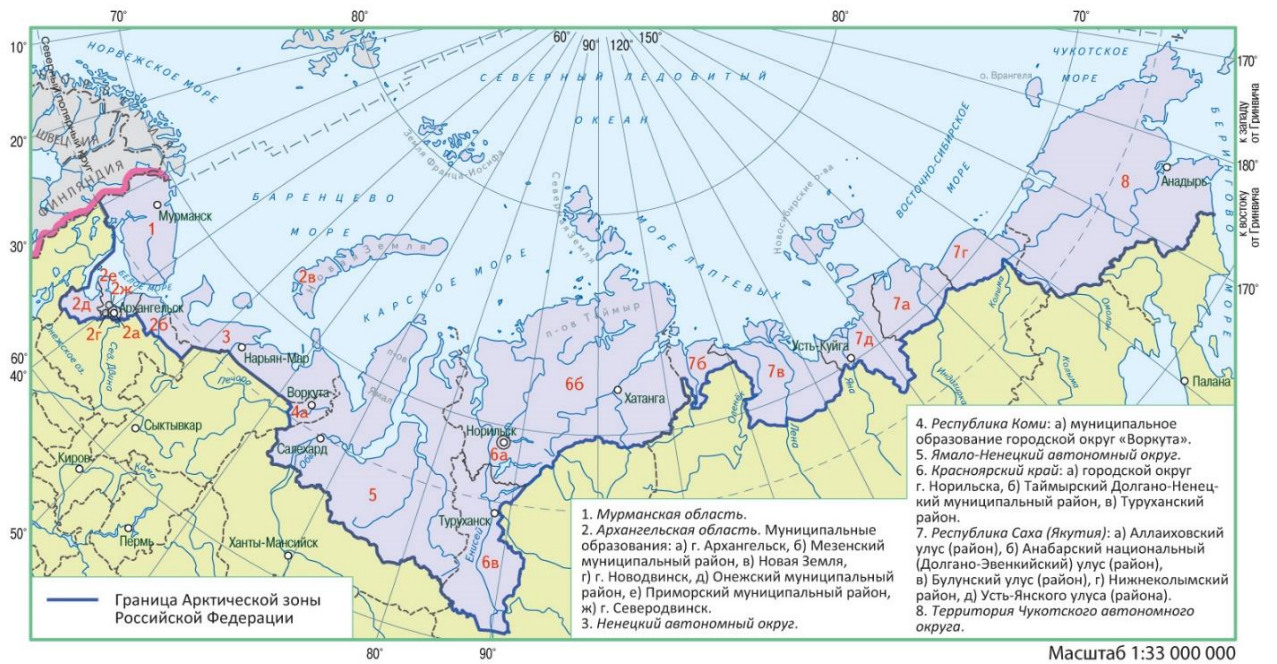


Рисунок 1.1.1 – Карта арктической зоны Российской Федерации

Значения температур воздуха внешней среды Арктики представлены на Рисунках 1.1.2, 1.1.3 [9, 10] и в Таблицах 1.1.1 и 1.1.2 [11].

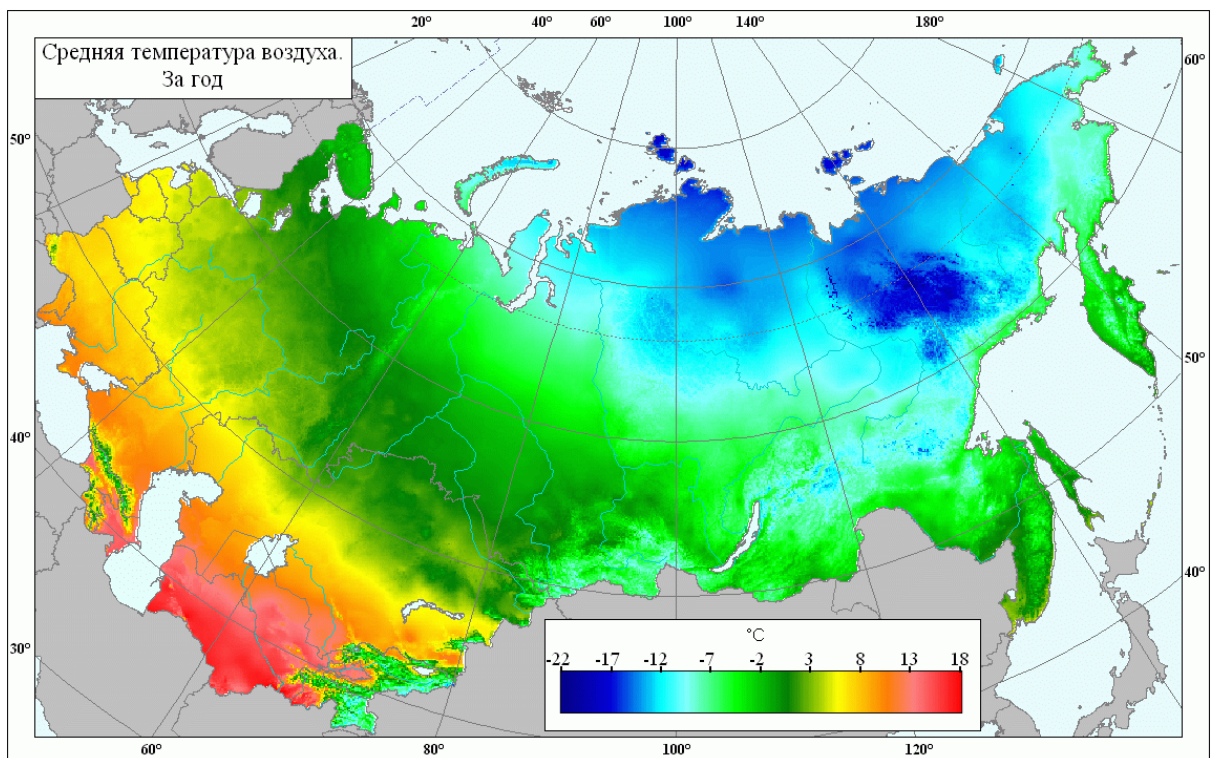


Рисунок 1.1.2 – Карта среднегодовой температуры воздуха за год

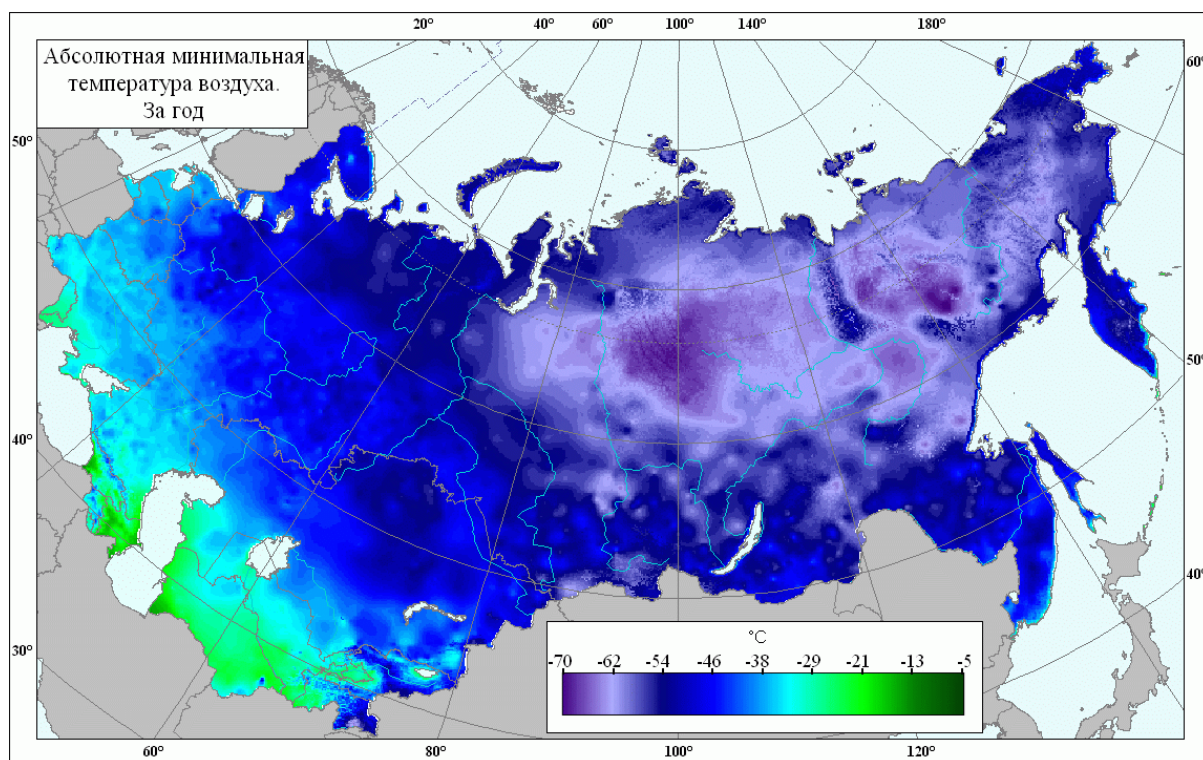


Рисунок 1.1.3 – Карта абсолютного минимума температуры воздуха за год

Таблица 1.1.1 – Статические характеристики распределения температуры воздуха в климатических районах Арктики

Климатически район Арктики	Средняя годовая температура, °С	Стандартное отклонение, °С
Приполюсный	-17,8	-
Восточный	-13,4	16,0
Западный	-7,0	11,4

Таблица 1.1.2 – Абсолютные значения температуры воздуха в климатических районах Арктики

Климатически район Арктики	Температура воздуха, °С	
	абсолютный минимум	абсолютный максимум
Приполюсный	-53	5
Восточный	-50	33
Западный	-43	31

Немаловажным условием воздействия температуры на БПЛА является условие воздействия температур в зависимости от тактико-технических характеристик БПЛА.

БПЛА разделяют на группы и категории в зависимости от критериев: взлётной массы; дальности; высоты и продолжительности полёта; размеров аппарата [12, 13]. Для определения температур, воздействующих на БПЛА в диссертационной работе наиболее интересующие критерии, являются высота и продолжительность полета. Классификация БПЛА по тактико-техническим характеристикам, по которым определялись температурные условия полёта по высоте БПЛА и его время работы на высотах, представлена в Таблице 1.1.3 [14].

Таблица 1.1.3 – Классификация БПЛА по лётным параметрам

Группа	Категория	Высота полета, м	Продолжительность полета, ч
Малые	Нано-БПЛА	100	1
	Микро-БПЛА	250	1
	Мини-БПЛА	150 ÷ 300	< 2
Средние	Легкие БПЛА с малой дальностью полета	3000	3 ÷ 6
	Средние БПЛА	5000	6 ÷ 10
	Средние БПЛА с большой продолжительностью полета	8000	10 - 18
	Маловысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	3000	> 24
	Средневысотные БПЛА с большой продолжительностью полета	5000 ÷ 8000	24 ÷ 48
Среднетяжелые	Высотные БПЛА с большой продолжительностью полета	20000	24 ÷ 48
Специального назначения	Стратосферные БПЛА	> 20000	> 48
	Экзостратосферные БПЛА	> 30500	-

Таким образом, температура внешней среды, возникающая в условиях рабочей высоты полёта БПЛА, имеет значения, представленные в Таблице 1.1.4 [15].

Таблица 1.1.4 – Температура атмосферы при высотах полета различных БПЛА

Группа БПЛА	Температура атмосферы на высотах полёта БПЛА, °C
Малые	14,35 ÷ 13,05
Тактические	-4,55 ÷ -36,95
Стратегические	-56,55
Специального назначения	-56,55 ÷ -46,15

Также при рассмотрении условий температурного воздействия на БПЛА, имеет место быть условие эксплуатационных пермеаметров БПЛА. В эксплуатационные параметры БПЛА входят: хранение; транспортировка; проведение технических работ, таких как подготовка, к работе БПЛА, ремонт, проведение проверочных работ по функционированию агрегатов БПЛА, обкатка изделия на месте и др. То есть воздействие температур при нахождении БПЛА частично или полностью в нерабочем состоянии.

Если все вышеперечисленные эксплуатационные работы проводятся на открытой местности, то в этом случае есть вероятность воздействия температур, с учётом температур присуще климатическому району, таких как воздействие солнечного излучения.

Интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения (верхнее рабочее значение) для высот до 15 км включительно составляет 1125 Вт/м, в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра (длина волн 280-400 нм) - 68 Вт/м [16]. Интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения (верхнее рабочее значение) для высот свыше 15 км составляет 1380 Вт/м [0,033 кал/(см·с)], в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра (длина волн 200-400 нм) - 140 Вт/м [16]. Таким образом, влияние воздействия излучением на БПЛА при условии его высот полёта и условий эксплуатационных пермеаметров с учётом воздействия температур, зависящие от климата района незначительны.

Немаловажным признаком возникновения воздействия температуры являются температуры, возникающие в самом БПЛА при его рабочем состоянии (местный нагрев). Источником выделения температуры в БПЛА в основном являются двигательные установки, генераторы, электрооборудование и электронная, радиоэлектронная аппаратура. В таких случаях применяются системы охлаждения, кондиционирования и т. д. Применительно к БПЛА гражданского применения воздействие температур при местном нагреве незначительные, поскольку вид применения таких БПЛА не требует большого технического оснащения.

Все вышеупомянутые условия прямо или косвенно влияют на эффективность работоспособности БПЛА, но наиболее интересующей в диссертационной работе проблемой является эксплуатация БПЛА в температурных условиях Арктики.

1.2 Виды температурного воздействия на БПЛА

Под температурными воздействиями на БПЛА понимаются процессы теплообмена, возникающие при эксплуатации БПЛА, в частности, его полёта. Основными процессами теплообмена БПЛА, возникающими в полете, являются конвективный теплообмен с внешней средой и теплообмен излучением. Влияние процессов теплообмена в большей степени зависит от скорости полёта БПЛА, в случае теплообмена излучением – высоты полёта БПЛА, соответственно.

Требования к БПЛА гражданского применения по тактико-техническим характеристикам намного упрощены по сравнению с БПЛА военного применения. В следствие выше сказанного, скорость БПЛА гражданского применения составляет примерно от 50 до 300 км/ч. Поэтому решения задач сложных и интенсивных температурных воздействий, возникающих в полете БПЛА отсутствуют, подобным процессам аэродинамического нагрева [17, 18].

Что касается теплообмена излучением, то его процессы теплообмена проходят в пределах значений плотности потока энергии солнечного излучения и плотности потока ультрафиолетовой части спектра, описанных в подразделе 1.1.

Если рассматривать местный нагрев БПЛА, то в таком случае в БПЛА протекают комбинированные процессы теплообмена, состоящие из конвективного теплообмена и теплопроводности.

Вследствие вышесказанного, наиболее важной и основной проблемой процессов теплообмена БПЛА будет конвективный теплообмен БПЛА при воздействии температур, возникающих в условиях высоты полёта и климата Арктики [19].

1.3 Влияние температуры на элементы конструкций и агрегатов БПЛА

При воздействии экстремальных температур на БПЛА в условиях полёта, транспортировки, хранения и других видов эксплуатации существует вероятность отказа работы БПЛА или его элементов и вероятность снижения качества работы БПЛА и его элементов. Это обуславливается тем, что при воздействии экстремально низких температур на БПЛА наиболее чувствительными элементами к температурным воздействиям являются радиоэлектронная аппаратура (РАЭ), вычислительные блоки, бортовое оборудование, топливный отсек (в зависимости от используемого типа двигательной установки), отсеки с полезной нагрузкой и др.

Влияние температуры на работоспособность РАЭ и других видов электронной аппаратуры обуславливается тем, что материалы, применяемые в электронной аппаратуре, под воздействием температуры склонны к быстрому изменению физико-химических и механических свойств [20, 21].

Воздействие температуры является причиной изменения электрических свойств аппаратуры вследствие изменения электрического

сопротивления резисторов, ухудшения сопротивления изоляции диэлектриков, изменения ёмкости конденсаторов и т. д. [22].

Воздействие температуры приводит к старению материалов. Некоторые элементы аппаратуры, в частности, электролитические конденсаторы, химические источники питания, при низких температурах теряют свои свойства. Ухудшение параметров изоляционных материалов может привести к механическим повреждениям конструкции в целом. Из-за повышения, например вязкости, часто наблюдается увеличение трения между отдельными подвижными элементами конструкции [22].

Влияние температуры на работоспособность двигательных установок (ДУ) обуславливается его типом и топливом, применяемым в ДУ.

Для авиационных ДУ, как например, турбореактивные (ТРД), турбовентиляторные (ВВД), турбовинтовые двигатели (ТВД), применяется авиационный керосин. Если рассматривать данный вид топлива на низкотемпературные свойства, то понижение температуры топлива вызывает непрерывное повышение его вязкости, что влечёт к высоким гидравлическим потерям, следовательно, уменьшается производительность топливных насосов. Снижение качества распыла и испарения топлива при подаче в камеру сгорания также даёт влияние воздействия низких температур.

Немаловажным является то, что при снижении температуры топлива происходит образование кристаллов углеводородов или льда. При этом фильтрующая способность топливных фильтров ухудшается вплоть до забивки фильтров и прекращения подачи топлива к форсункам [23].

В качестве примера, температура кристаллизации отечественных топлив ТС-1, РТ составляет минус 60°C [23].

Кроме того, понижение температуры топлива ниже 0°C приводит к превращению эмульсии воды в суспензию льда. При высокой чистоте заправляемого топлива эмульсионная вода может находиться в переохлаждённом (до температуры минус 40°C) состоянии. Образование льда в этом случае происходит при встрече капель переохлаждённой воды с

сеткой топливного фильтра, что приводит к забивке фильтра, прекращению подачи топлива и выключению двигателя [23].

Возникновение проблем эффективности работы БПЛА в экстремально низких температурах могут сопровождаться системами электроснабжения. Одним из основных элементов системы электроснабжения является источники электрического питания.

Рассмотрим вторичные источники питания – аккумуляторные батареи (АКБ). Основные виды АКБ, применяемые в авиации, являются кислотные и щелочные АКБ. Из которых наибольшее применение нашли АКБ: свинцовые (кислотные); серебряно-цинковые, кадмиево-никелевые (щелочные) АКБ [24-26].

Влияние температуры на удельную энергию АКБ представлено в Таблице 1.1.5 [27].

Таблица 1.1.5 – Зависимость удельной энергии АКБ от температуры

Тип АКБ		Удельная энергия, Вт·ч/кг		
		при плюс 20°С	при минус 20°С	при минус 40°С
Свинцовый		36	18	8
Серебряно-цинковый		90	40	6
Кадмиево- никелевый	Ламельный	20	11	5
	Безламельный	38	26	19

1.4 Современные средства термостатирования

Задачи по поддержанию эксплуатационной температуры конструкции различных ЛА решаются следующими видами термостатирования:

- системами термостатирования (СТ);
- теплоизоляционными конструкциями и покрытиями;
- теплоизоляционными материалами.

СТ можно классифицировать по следующим основным признакам.

По функциональному назначению СТ, которой зависит от элементов агрегатов аппарата. То есть, для каждого элемента, агрегата аппарата термостатирование должно выполняться разными способами и разными системами [28].

По способу термостатирования СТ подразделяются на активные, пассивные и комбинированные.

Активные СТ имеют в своём составе источники теплоты, холода и оборудование для подачи теплоносителя или хладоносителя к объекту термостатирования.

Пассивные СТ отличаются от активных СТ тем, что температурный режим объекта термостатирования обеспечивается непосредственно теплоизоляцией.

В комбинированных СТ используется два вышеупомянутых способа термостатирования. Такое решение термостатирования уменьшает энергозатраты на обогрев или охлаждение, минимизирует СТ по массе и экономичности.

По применяемому теплоносителю СТ подразделяются на воздушные и жидкостные. То есть передача температуры от источников осуществляется воздухом или другим газом (воздушная система обеспечения температурного режима). Системы термостатирования, в которых перенос теплоты осуществляется жидкостью (жидкостная система обеспечения температурного режима).

Под теплоизоляционной конструкцией понимается конструкция со структурным распределением в ней различных материалов. Как правило, такие конструкции состоят из основного материала – теплоизоляционного или теплозвукоизолирующего, наружного защитного покрытия и крепления.

В зависимости от назначения конструкций, условий их службы, в состав конструкций дополнительно вводят антикоррозионные, огнестойкие, высоко термостойкие, паро- и гидроизоляционные слои материалов.

Применительно к авиастроению, теплоизоляцию летательного аппарата осуществляют следующим конструктивным решением. В классическом виде фюзеляж летательного аппарата состоит из несущей наружной обшивки и несущей конструкции внутреннего каркаса, на который устанавливаются слои теплоизоляции [29, 30]. Теплоизоляция выполнена из одного или нескольких слоёв отдельных пластин, панелей, которых крепят к шпангоутам и стрингером различными креплениями в виде козырьков, застёжек и шнуров [31-35].

Другой вариант конструктивного решения обеспечения теплоизоляции летательных аппаратов заключается в том, что теплоизоляцию устанавливают на несущую конструкцию внутреннего каркаса стрингеры и рамы, которых расположены на наружной стороне [36].

Сами пластины, панели, используемые в авиастроении в качестве теплоизоляции, рассмотрены на примерах, перечисленных ниже.

Зарубежная компания Johns Manville Corp. производит теплозвукоизоляционную систему для использования в летательных аппаратах, в которую входит материал из одного или нескольких волокнистых стекломатов или вспененного материала и множества вытянутых элементов для упрочнения этого материала [37]. В качестве упрочняющих элементов могут быть использованы прутки или проволока, выполненные из материала, как стеклопластик, углепластик, металл. В системе также может быть использован адгезив для скрепления между собой слоёв теплоизоляционного мата, такой как фенольная, акриловая или латексная смола [38].

Компанией Boeing предложена модульная система теплоизоляции [39], которая включает множество модулей из волокнистых блоков и двухслойного покрытия, имеющего наружный слой и внутренний слой со сварными швами по периметру и между блоками (см. рис. 1.1.5). Наружный слой покрытия перфорирован [38].

Волокнистые блоки могут быть изготовлены из нетканого или тканого материала, стекловолокна, минеральной ваты или керамических волокон. Покрытие представляет собой термопластичную плёнку из группы синтетических полимеров, сополимеров, коэкструдированных полимеров из группы, содержащей поливинилфторид, полиимид, полиэфир, полиуретан, полиэтилен, полипропилен и др.

В качестве отечественных теплоизоляционных конструкций используют теплозвукоизоляционный материал, обернутый влагонепроницаемым материалом, сформированным в гермопакет, в котором, по меньшей мере, один брусок, размещенный внутри гермопакета, выполненный в виде призмы, жестко скрепленный двумя гранями с внутренней поверхностью гермопакета, и текстильную застежку, зафиксированную нерабочей поверхностью одной из лент на наружной поверхности гермопакета напротив одной из граней бруска, скрепленной с его внутренней поверхностью [40].

Другой вариант исполнения теплоизоляции для применения в условиях криогенных температур, аэродинамического нагрева и высоких рабочих давлений состоит из многослойной системы материалов, в которую входит изолируемая поверхность со слоем теплоизоляции в виде пенопласта, установленный на амортизационный слой, слоем теплозащиты и закреплённым на последнем антистатическим покрытием [41]. Или теплозащитное покрытие, состоящее из внутренней (силовой) оболочки корпуса, мата теплоизоляции с газопроницаемой оболочкой, теплозащитного слоя, дренажных отверстий и матов теплоизоляции с газонепроницаемой оболочкой [42].

Материалы, применяемые для обеспечения теплоизоляции, характеризуются такой структурой, которая обеспечивает статичность и изолирование содержащегося в нем воздуха или другого вида газа. Другими словами, материал своей структурой исключает теплообмен газа, содержащегося в нем, с внешней средой.

Теплоизоляционные материалы подразделяют по многим параметрам. Например, теплоизоляционные материалы подразделяют по форме, структуре, виду исходного сырья, жёсткости и т.д. Где по форме материалы подразделяют на штучные, рулонные и шнуровые, рыхлые и сыпучие материалы. По структуре материалы подразделяют на волокнистые, зернистые ячеистые материалы. По виду исходного сырья, материалы подразделяют по неорганические, органические, композиционные материалы.

Наибольшее применение материалов в техническом и строительном производстве находят волокнистые материалы на основе неорганического исходного сырья [43]. Это обуславливается тем, что такие материалы в большей степени не горючи, не поддержаны воздействию микроорганизмов, морозостойкости и для их производства не требуется дефицитное сырьё. К неорганическим теплоизоляционным материалам относят минеральную вату, и изделия из неё, асбестовые изделия, утеплители на основе перлита и вермикулита, диатомита, трепала, пеностекло и др.

Для использования в качестве теплоизоляции летательных аппаратов самым распространённым материалом является теплоизоляционный материал на основе стекловолокна [31-35, 43, 44]. Основным компонентом стекловолокна является диоксид кремния (SiO_2), что определяет интервал его рабочей температуры в зависимости от состава – 600 до 1000°C. Помимо стекловолокна используют базальтовые, кварцевые и муллитокремнеземные волокна, волокна на основе оксида алюминия (Al_2O_3) [43, 45]. Материалы из кремнезёмных волокон имеют высокие изоляционные характеристики и длительно выдерживают температуру до 1200°C, кратковременно – до 1700°C. Более высокой температуры эксплуатации позволяют достичь керамические волокна на основе оксида алюминия [46]. В работах [47-50] проводятся исследования процессов теплопереноса в волокнистых теплоизоляционных материалах и исследования определения их характеристик.

В последнее время наибольший интерес проявляют к применению аэрогелей различного состава в качестве теплоизоляционных материалов. Разрабатывать методы получения функциональных материалов с использованием аэрогелей материаловеды начали практически сразу после разработки метода получения аэрогелей различного состава. В настоящее время разработано большое количество композиционных материалов, содержащих аэрогели в сочетании с другими компонентами, придающими требуемые свойства композиту. Для теплоизоляционных и теплозащитных материалов это, как правило, тугоплавкие неорганические компоненты из числа уже используемых в качестве теплоизоляции, а именно: керамические, стеклянные, минеральные волокна [51].

Компания Боинг (США) в патенте US 8357258 предложила использовать пропитанные аэрогелем волокнистые слои для изготовления теплоизоляционной керамической плитки из оксид-оксидного керамического композиционного материала для снижения её теплопроводности [51, 52].

Американская компания «Aspen Aerogels» производит теплоизоляционные материалы марок: Pyrogel XT, Pyrogel XT-E, Pyrogel XTF; Cryogel Z, Cryogel x201; Pyrogel 2250, Pyrogel 6650 [53-57]. Pyrogel XT, Pyrogel XT-E, Pyrogel XTF являются высокотемпературной гибкой теплоизоляцией на основе кварцевого аэрогеля. Cryogel Z, Cryogel x201 являются нанопористой теплоизоляцией, которая представляет собой стекловолокнистый холст с распределёнными в нем частицами аэрогеля диоксида кремния. Материалы Pyrogel 2250, Pyrogel 6650 являются нанопористой теплоизоляцией, которые производятся по запатентованной нанотехнологии на основе кварцевого аэрогеля с усилением микроволокнами.

Корпорация MRA Systems предложила слоистую теплоизоляцию для самолётов, содержащую аэрогелевый теплоизоляционный материал, заключённый между слоями композиционного материала, содержащего волокна в эпоксидной матрице [51,58].

Китайские разработчики запатентовали ряд теплоизоляционных материалов, включающих слои аэрогеля, армируемые тугоплавкими волокнами в различных соотношениях и комбинациях [51, 59-64].

Заключение по главе 1

Для формирования проектно-конструкторских решений по созданию средств теплоизоляции для БПЛА были проведены следующие задачи:

1. Определение температурных условий эксплуатации БПЛА:
 - температурные условия в климатических районах Арктики;
 - влияние тактико-технических характеристик БПЛА на температурные условия его работы;
 - температурные условия в БПЛА при проведении эксплуатационных параметров.
2. В зависимости от применения БПЛА и его тактико-технических характеристик определены виды температурного воздействия.
3. Проведён краткий анализ влияние воздействий температур на эффективность работы БПЛА и его элементов и агрегатов.
4. Проведён краткий анализ текущего состояния термостатирования летательных аппаратов в условиях экстремально низких температур.

ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1 Математические модели, используемые в исследованиях определения принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций

Основным физическим процессом, рассматриваемым в диссертационной работе, является процесс теплообмена в сплошных средах – теплопроводность.

Уравнение нестационарного переноса тепла теплопроводностью (уравнение Фурье – Кирхгофа) в декартовой системе координат описывается следующим образом [65]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T), \quad (1)$$

где ρ – плотность; c – удельная теплоёмкость; λ – коэффициент теплопроводности; $Q_w(x, y, z, t, T)$ – мощность внутренних источников тепловыделения; x, y, z – координаты декартовой системы координат.

В цилиндрической системе координат уравнение нестационарного переноса тепла теплопроводностью описывается следующим образом [65]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_w(r, \varphi, z, t, T), \quad (2)$$

где r – радиальная, φ – угловая, z – аксиальные координаты.

В сферической системе координат уравнение нестационарного переноса тепла теплопроводностью описывается следующим образом [65]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \mu^2} \left[(1 - \mu^2) \frac{\partial T}{\partial \mu} \right] + \frac{\lambda}{r^2 (1 - \mu^2)} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} + Q_w(r, \theta, \psi, t, T), \quad (3)$$

где $\mu = \cos\theta$; θ и ψ – угловые координаты.

Формирование постановки краевой задачи для уравнений (1)-(3) определяется геометрическими, физическими, начальными и граничными условиями. Описание данных условий рассматривается в декартовой системе координат.

Начальные условия определяются распределением температуры в теле в начальный момент времени [66]:

$$t = 0: T = f(x, y, z). \quad (4)$$

Граничные условия определяются в зависимости от вида воздействия температуры. Наиболее часто используемые граничные условия в задачах являются:

– граничные условия первого рода

$$T = T_{нов.}(x, y, z, t), \quad (5)$$

где $T_{нов.}$ – температура на поверхности тела;

– граничные условия второго рода:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right)_{нов.} = q_{нов.}(x, y, z, t), \quad (6)$$

где \vec{n} – нормаль к поверхности тела, $q_{нов.}$ – тепловой поток;

– граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right)_{нов.} = \alpha(T_{сред.} - T), \quad (7)$$

где α – коэффициент теплообмена;

– граничные условия четвертого рода, которые характеризуют равенство температур и тепловых потоков по обе стороны от границы раздела сред:

$$\begin{cases} -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \vec{n}} \right)_Г = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \vec{n}} \right)_Г ; \\ T_1(x_Г, y_Г, z_Г, t) = T_2(x_Г, y_Г, z_Г, t), \end{cases} \quad (8)$$

где $x_Г, y_Г, z_Г$ – координаты границы раздела сред; T_1, T_2 – температуры соприкасающихся сред.

Геометрические условия определяют форму и размеры тела, в котором протекает изучаемый процесс. Физические условия определяют теплофизические характеристики тела: коэффициент теплопроводности; плотность, удельная теплоёмкость.

В диссертационной работе теоретические исследования теплопроводности различных тел в большей степени проводятся в декартовой системе координат. Для проведения теоретических исследований теплопроводности уравнение (1) ограничивается до уравнений [67]:

– двумерного нестационарного переноса тепла теплопроводностью:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_w(x, y, t, T); \quad (9)$$

– одномерного нестационарного переноса тепла теплопроводностью:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T). \quad (10)$$

Краевая задача для уравнений (9), (10) определяется условиями (5)-(7) с учетом мерности рассматриваемой задачи переноса тепла теплопроводностью.

В случае проведения исследований с неоднородными телами математическая постановка задачи принимает вид [67]:

– для двумерного нестационарного переноса тепла теплопроводностью:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + Q_w(x, y, t, T), \\ \dots \\ \rho_n c_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} \right) + Q_w(x, y, t, T); \end{cases} \quad (11)$$

– для одномерного нестационарного переноса тепла теплопроводностью:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T), \\ \dots \\ \rho_n c_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T), \end{array} \right. \quad (12)$$

где n – количество используемых элементов в теле с их различными теплофизическими характеристиками.

Краевая задача для уравнений (11), (12) определяется условиями (5)-(7) с учетом мерности рассматриваемой задачи переноса тепла теплопроводностью. Равенство температур и тепловых потоков (8) по обе стороны от границы раздела элементов примет вид [67]:

– по координате x :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x, y, t) = T_2(x, y, t), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \\ \dots \end{array} \right. ; \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{n-1}(x, y, t) = T_n(x, y, t), \\ -\lambda_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x}, \end{array} \right.$$

– по координате y :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x, y, t) = T_2(x, y, t), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \\ \dots \end{array} \right. . \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{n-1}(x, y, t) = T_n(x, y, t), \\ -\lambda_{n-1} \frac{\partial T_{n-1}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y}, \end{array} \right.$$

В случае проведения теоретических исследований теплообмена с конструкциями, имеющие замкнутые полости и содержащие в них газ или жидкость, то для проведения таких исследований решаются уравнения для вектора завихренности скорости, Пуассона для функции тока и энергии. В

декартовой системе координат данные уравнения записываются следующим образом [68-70]:

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} \rho \beta g \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -2\omega, \quad (16)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (17)$$

где u, v – составляющие скорости в проекции на оси x, y ; ω – вектор вихря; ψ – функция тока; g – ускорение свободного падения; β – температурный коэффициент объемного расширения; μ – коэффициент кинематической вязкости.

В уравнения (15) – (17) вводятся:

– функции тока:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad (18)$$

– вектор вихря скорости:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (19)$$

В полярной системе координат уравнения естественной конвекции описываются следующими уравнениями [68, 69, 71]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_r \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} + \frac{\omega}{r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) \\ + \beta g \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \sin \varphi - r \frac{\partial T}{\partial r} \cos \varphi \right), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} = \frac{\omega}{r}, \quad (21)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{uT}{r} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (22)$$

где V_r, V_φ – составляющие скорости в проекции на оси r, φ .

В уравнения (20) – (22) вводятся:

– функции тока:

$$V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}, \quad V_\varphi = -\frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad (23)$$

– вектор вихря скорости:

$$\omega = \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - V_\varphi - r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r}. \quad (24)$$

Физические, начальные и граничные условия параметров $\psi, \omega, T, \frac{\partial \psi}{\partial r}$,

$\frac{\partial \psi}{\partial \varphi}, \frac{\partial \psi}{\partial x}, \frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial r}, \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}$ определяются в зависимости от

постановки математической задачи.

Для проведения теоретических исследований различных физических процессов в настоящее время наиболее популярным является исследования задач физических процессов численными методами. Выше сказанное обуславливается развитой вычислительной техникой, и большим разнообразием программных систем теоретического исследования физических процессов, развитием методов вычисления и описания более сложных физических процессов.

В данной работе для проведения теоретических исследований повышения теплоизоляционных свойств конструкций использовался метод конечных разностей (МКР). Выбор данного метода обуславливается тем, что исследования и задачи, проводимые в данной работе, не требуют решения сложных систем уравнений, не рассматривается описания сложных физических процессов, требующие более сложные методы вычисления. И в связи с тем, что в работе отсутствуют исследования, где участвуют элементы со сложной геометрией (необходимость описания геометрии в исследовании), необходимости рассматривания задач в 3-х мерном виде не существует. Также существует большое количество учебной, учебно-

методической, научной литературы, в которых подробно описан данный метод вычислений [72-74]. То есть, для получения результатов по поставленным задачам решение МКР является наиболее эффективным и оптимальным.

Решения краевых задач МКР производится следующим способом. Вместо производных в дифференциальном уравнении используется их конечно разностные аппроксимации. Для проведения теоретических исследований теплопроводности объект исследования представляют в виде совокупности узлов. Аппроксимируя частные производные дифференциального уравнения конечными разностями, получают систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры, как локальной характеристики в каждом узле сетки [72]. Для получения замкнутой системы используют разностное представление граничных условий (5) – (8), (13), (14).

2.2 Повышение теплоизоляционных свойств разрабатываемых конструкций по теплофизическим характеристикам материалов

Для повышения теплоизоляционных свойств материала решаются технические и инженерные задачи по определению и созданию материалов с низким коэффициентом теплопроводности [47-50, 75, 77]. В данном исследовании рассматривается задача повышение теплоизоляционных свойств за счёт зависимости плотности и коэффициента теплопроводности.

Проведём исследования теплопроводности с вариацией характеристик материалов, где каждый материал варьируется по плотности и варьируется по коэффициенту теплопроводности, а удельная теплоёмкость остаётся неизменной. Решение неизменности параметра удельной теплоёмкости материалов в данном исследовании обуславливается тем, что создание материала с определёнными, заданными значениями удельной теплоёмкости технологически контролировать сложнее в отличие от плотности.

Рассмотрим несколько условий в исследовании теплопроводности:

- 1) Условие, где: $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$;
- 2) Условие, где: $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$.

Данные условия определяются из физически возможных вариаций теплофизических характеристик материалов. Теплофизические характеристики $\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ и $\rho_{\min} \div \rho_{\max}$ задаются одинаковыми по отношению к вышеуказанным условиям.

Рассмотрим вышеупомянутые условия на материалах в виде, указанных в Таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1 – 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	λ_{\min}	$\rho_1 > \rho_{\min}$		$5 \cdot 10^{-7}$
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 2.2.1, рассмотрена математическая постановка задачи теплопроводности материалов в безразмерных переменных. Подобное решение обуславливается тем, что решение задач в безразмерном виде с учётом использования критерий подобия позволяют результаты исследований распространить и на другие решаемые задачи, подобные

исследуемому. Область решения математической постановки задачи представлена на Рисунке 2.2.2.

Для приведения к безразмерному виду уравнения теплопроводности использовались соотношения:

$$\chi = \frac{X}{x}, \tau = \frac{t}{t_0}, \theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0},$$

где X – координата для декартовой системы координат; χ – безразмерная координата, которая соответствует координате X ; x – толщина полости в рассматриваемой области решения задачи по оси X ; t – время; t_0 – масштаб времени; τ – безразмерное время; T – температура; T_1 – температура источника энергии; T_0 – начальная температура полости; θ – безразмерная температура.

Ниже приведено безразмерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \chi^2}, \quad (25)$$

где число Фурье $Fo = \frac{at_{хар}}{L^2}$; $t_{хар}$ – характерное время изменения внешних условий; L – характерный размер тела.

Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: \theta = \theta_0, 0 < \chi < \chi_1. \quad (26)$$

На границе $\chi = \chi_1$ выполняется условие:

$$\theta = \theta_e, t > 0, \quad (27)$$

где $\theta_e = 1$ – безразмерная величина воздействующей температуры.

На границе $\chi = 0$ задано условие:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \chi} = 0. \quad (28)$$

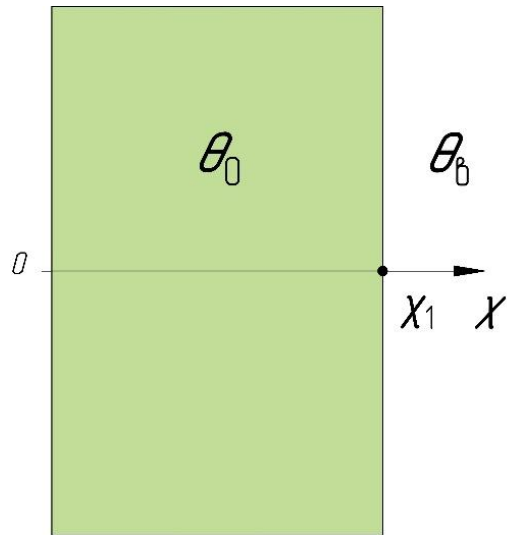


Рисунок 2.2.1 – Область решения задачи

Краевая задача для уравнения (25) с учетом начальных и граничных условий (26) – (28) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы. Результаты исследования теплопроводности материала представлены на Рисунке 2.2.2.

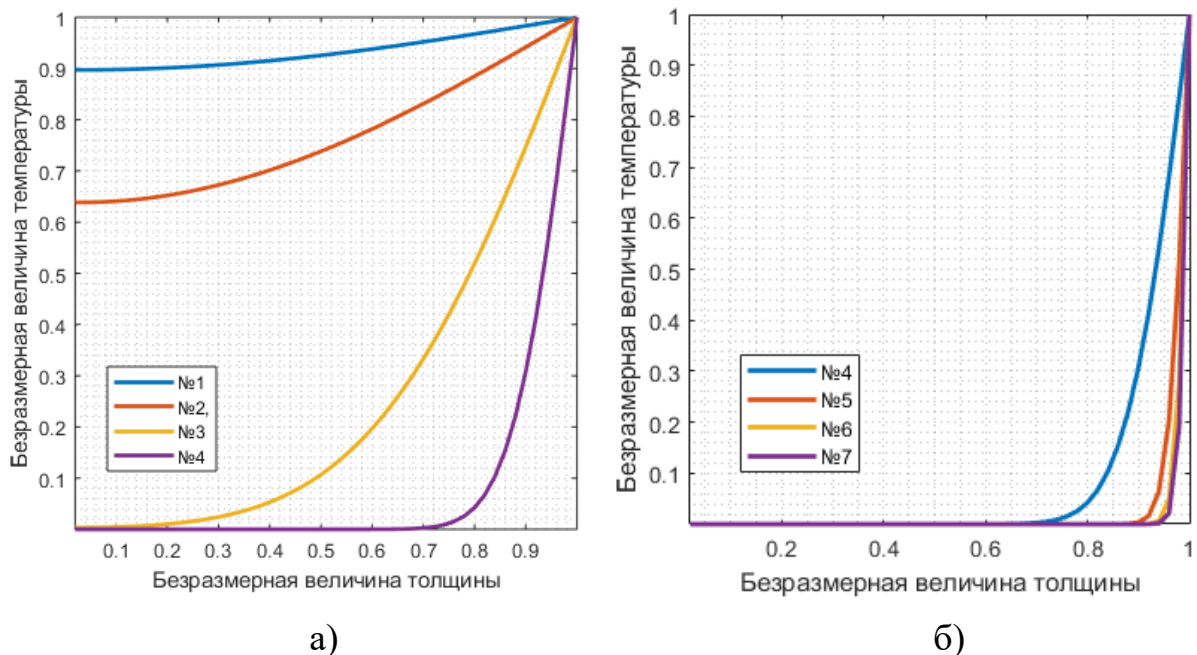


Рисунок 2.2.2 – Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии температуры, где: а) условие $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ (материалы №1-4); б) условие $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$ (материалы №5-7)

Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии температуры, для первого условия (условие $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div$

λ_{\max}) показывают, что наиболее эффективными теплоизоляционными свойствами является материал №4, что является предсказуемым результатом, поскольку материал обладает наименьшим коэффициентом теплопроводности в отличие от материалов №1-3 (Рисунок 2.2.2, а).

Наиболее показательные результаты обладают исследования со вторым условием (условие $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$), которое показывают, что наиболее эффективными теплоизоляционными свойствами обладает материал №7. Данный материал имеет большое отношение между плотностью и коэффициентом теплопроводности. То есть материал имеет минимальное значение коэффициента теплопроводности и максимальное значение плотности, заданные в рамках исследования. Следует отметить, что материалы №4, имеющие минимальные показатели коэффициента теплопроводности уступают материалам №5-7, хотя параметр λ_{\min} для этих материалов задаётся одинаковым.

Рассмотрим исследования теплопроводности материалов с вышеперечисленными условиями при воздействии конвекции.

На границе $\chi = \chi_1$ выполняется условие:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \chi} = Bi(\theta_s - \theta), \quad (29)$$

где число Био $Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}$.

Результаты исследования теплопроводности материала представлены на Рисунке 2.2.3.

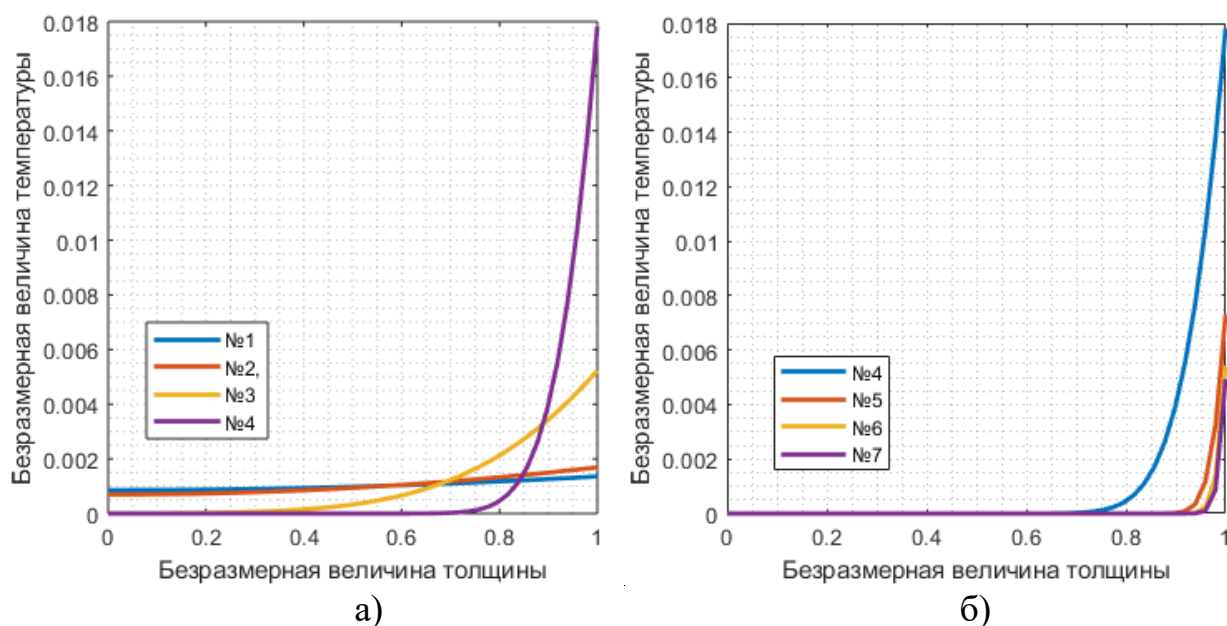


Рисунок 2.2.3 – Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии конвекции, где: а) условие $\rho = \rho_{\min}$ и $\lambda = \lambda_{\min} \div \lambda_{\max}$ (материалы №1-4); б) условие $\lambda = \lambda_{\min}$ и $\rho = \rho_{\min} \div \rho_{\max}$ (материалы №5-7)

Результаты исследования теплопроводности материалов при воздействии конвекции имеет похожие результаты по показателям теплоизоляции материалов, что и при воздействии температуры, но с распространением температуры в материалах характерное при воздействии конвекции.

2.3 Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой

На данный момент конструктивная схема теплоизоляционных материалов описывается следующим образом. Как было сказано в первой главе, в разделе 1.4, теплоизоляционная конструкция состоит из основного материала – теплоизоляционного или теплозвукоизолирующего, наружного защитного покрытия и крепления.

В данном разделе проводятся исследования повышения теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой [78, 79]. Рассматривается влияние подборки материалов,

взаимодействующие между собой в конструкции (элементе), на теплоизоляционные свойства. Данное исследование отражается в работах [80, 81].

Исследование теплопроводности проводится с вариацией времени t воздействия температуры T_6 составляет минус 50°C от 10 до 600с на комплектующие элементы (Рисунок 2.3.1), имеющие начальную температуру T_0 , которая составляет 25°C :

- 1) Элемент однородный с $a = 1 \cdot 10^{-7}$;
- 2) Элемент многослойный, где:
 - от 0 до x_1 и от x_2 до x_3 , $a_1 = 1 \cdot 10^{-7}$;
 - от x_1 до x_2 и от x_3 до x_4 , $a_2 = 4 \cdot 10^{-6}$;
- 3) Элемент, где:
 - от 0 до x_1 и от x_2 до x_3 , $a_1 = 4 \cdot 10^{-6}$;
 - от x_1 до x_2 и от x_3 до x_4 , $a_2 = 1 \cdot 10^{-7}$.

Толщины данных элементов в исследовании составляют 20 мм при $x_1 = x_2 = x_3 = x_4$.

Задаваемые теплофизические характеристики для материалов в элементах берутся из раздела 2.2, Таблицы 2.2.1.

Рассмотрим вышеупомянутые элементы с распределением материалов в виде Таблицы 2.3.1 с учётом области решения задачи, показанной на Рисунке 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Коэффициент температуропроводности материалов в зависимости от их распределения в элементе

Элементы №	Значение коэффициента температуропроводности a в зависимости от координат, $\text{м}^2/\text{с}$			
	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

Постановка математической задачи данного исследования производится в размерной системе координат с размерными параметрами, поскольку математическое описание тепловых потоков по обе стороны от

границы раздела материалов в элементе в данной форме являются более эффективным в отличие от приведения постановки математической задачи к безразмерному виду и общей критериальной форме.

Для исследования повышения теплоизоляционных свойств материалов конструкций, при условии взаимодействия материалов между собой, рассмотрена следующая математическая постановка задачи, где область решения задачи показана на Рисунке 2.3.1.

Уравнение теплопроводности для материала:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < x_1. \quad (30)$$

Система уравнений теплопроводности для элементов конструкции:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_n \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_n \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = a_n \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, x_2 < x < x_3; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = a_n \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, x_3 < x < x_4, \end{cases} \quad (31)$$

где n – нумерация коэффициента температуропроводности материалов в элементе в соответствии с таблицей 2.3.1; 1, 2, 3, 4 – нумерация слоев материала.

Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_1, x_4; \quad (32)$$

Граничные условия имеют вид:

– на границе $x = x_1, x_4$ выполняется условие:

$$T = T_B, t > 0; \quad (33)$$

– на границе $x = 0$ выполняется условие

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (34)$$

– на границах между слоями материалов выполняется условие

идеального контакта:

$$\begin{cases} T_1(t, x_1) = T_2(t, x_1), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_1} ; \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} T_2(t, x_2) = T_3(t, x_2), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_2} ; \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} T_3(t, x_3) = T_4(t, x_3), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_3} = -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=x_3} . \end{cases} \quad (37)$$

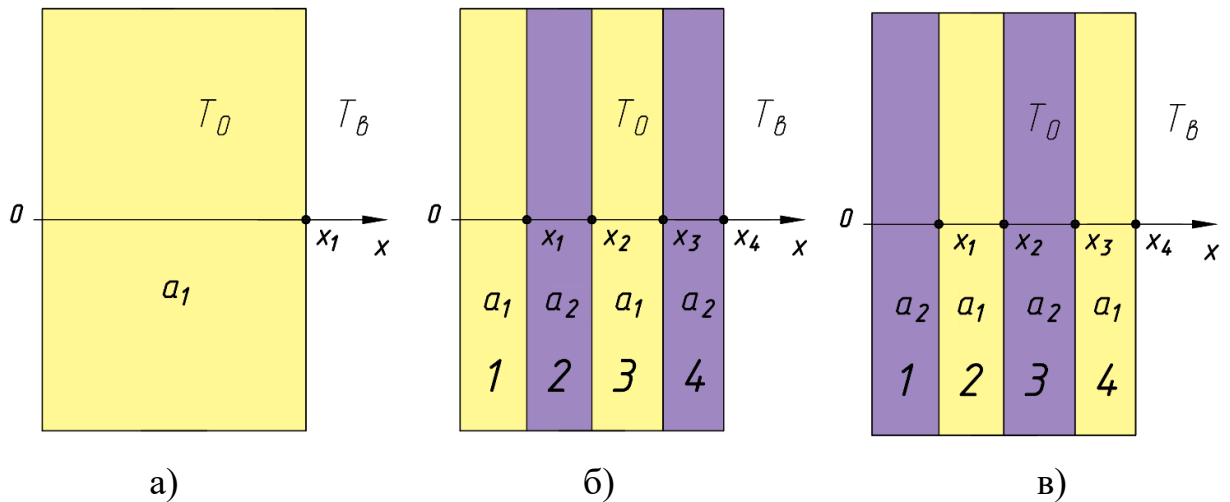


Рисунок 2.3.1 – Область решения задачи для элементов, где: а) №1; б) №2; в) №3

Как показано на Рисунке 2.3.1, в исследованиях теплопроводности рассматриваются элементы с неоднородной средой с учётом конкретных теплофизических характеристик материалов, а не задачей, в которой распределение тепла проходит по однородному материалу с соответствующими эффективными характеристиками неоднородной среды. Данный подход решения задачи, как показывают научные работы и исследования, обуславливается более точными результатами распределения температуры в элементе [82, 83].

Краевая задача для уравнений (30), (31) с учетом начальных и граничных условий (32) – (37) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы.

Результаты исследования теплопроводности элементов представлены на Рисунке 2.3.2.

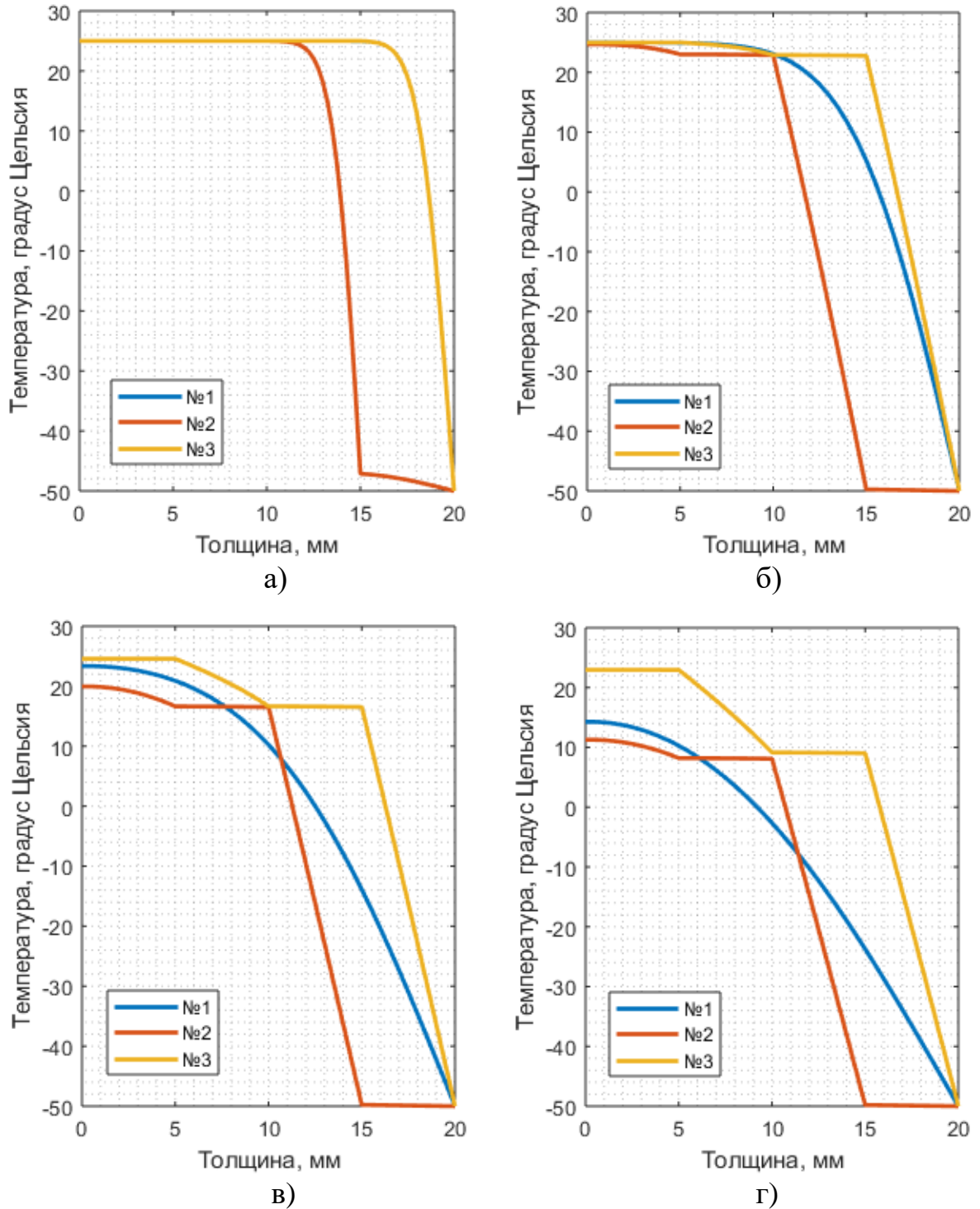


Рисунок 2.3.2 – Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры: а) 10 с; б) 100 с; в) 300 с; г) 600 с

Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры показывают, что элемент №3 имеет более высокие показатели теплоизоляции по сравнению с элементами №1 и №2. Температура на границе, где $x = 0$ элемента №1 за время воздействия температуры минус 50°C понизилась от начальной температуры, равной плюс 25°C до плюс 14°C (Рисунок 2.3.2, г). В элементе №2 температура понизилась от начальной температуры, равной плюс 25°C до плюс 18°C . В элементе №3 температура понизилась от начальной температуры, равной плюс 25°C до плюс 24°C , что показывает преимущество показателя теплоизоляции элемента №3 в 1.7-1.3 раза от элементов №1 и №2. Элемент №2 имеет низкий показатель теплоизоляции в отличие от элемента №3 вследствие того, что задаваемая температура T_g приходится на материал с высокими показателями теплопроводности.

Следует отметить, что показатели однородного элемента №1 (материала №7 раздела 2.2) по результатам исследований раздела 2.2 имеет лучшие показатели теплоизоляции, но в случае с элементом №3 и №2 проигрывает по показателям теплопроводности, хотя суммарный коэффициент теплопроводности элементов №3 и №2 больше, чем у элемента №1 (материала №7 раздела 2.2).

Рассмотрим аналогично исследования теплопроводности материалов с вышеперечисленными условиями при воздействии конвекции.

На границе $x = x_1, x_4$ выполняется условие:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_g - T). \quad (38)$$

Результаты исследования теплопроводности материала представлены на Рисунке 2.3.3.

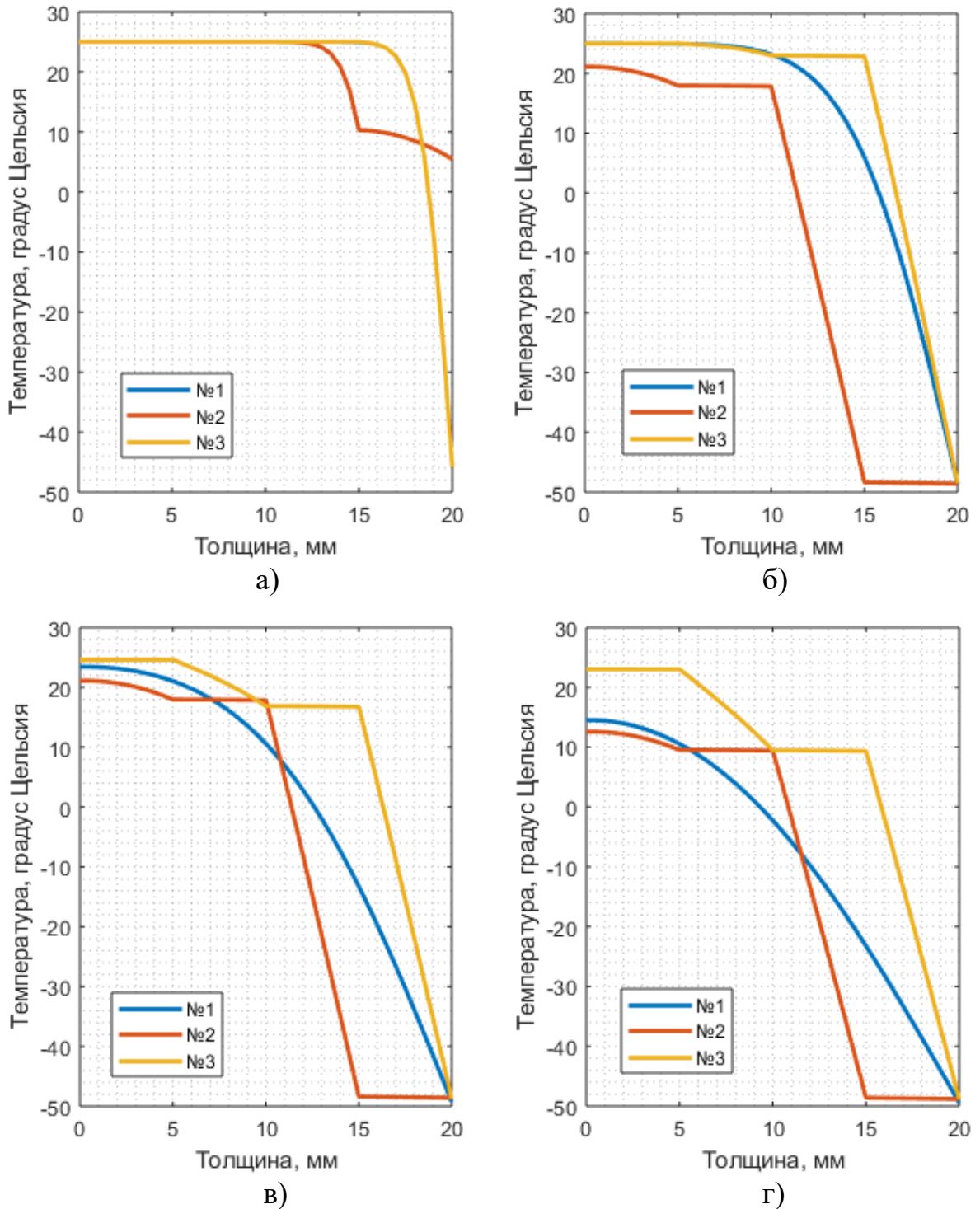


Рисунок 2.3.3 – Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии конвекции: а) 10 с; б) 100 с; в) 300 с; г) 600 с

Результаты исследования теплопроводности элементов при воздействии конвекции имеет похожие результаты по показателям теплоизоляции элементов, что и при воздействии температуры, но с распространением температуры в элементах характерное при воздействии конвекции.

2.4 Повышение теплоизоляционных свойств теплоизоляционных конструкций по структуре распределения материалов

Немало важной задачей при создании материала или конструкции служащие как средство теплоизоляции, является структура распределения материалов. Основные структуры распределения материалов в конструкциях и композитных материалах являются распределения материалов по слоям и распределения материалов по геометрическим структурам. Исследования по определению теплофизических характеристик многослойных конструкций и неоднородных материалов проводились, в частности, в работах [78, 79, 84].

Исследование повышения теплоизоляционных свойств конструкций по структуре распределения материалов в конструкции, проводилось в работе [85].

В данной работе рассматриваются элементы с распределениями материалов, указанные на Рисунке 2.4.1. Выбор проведения исследования с элементом, где распределение материалов проводится в шахматном порядке, обуславливается тем, что такое распределение характеризует в упрощённом, универсальном виде – распределение материалов в хаотическом порядке или геометрическом порядке. То есть рассматривается процесс неравномерного переноса тепла в элементе. Здесь, как и в предыдущих исследованиях, теплофизические параметры для материалов в элементах берутся из раздела 2.2, Таблицы 2.2.1. Таким образом, коэффициенты температуропроводности составляют для $a_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а для $a_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

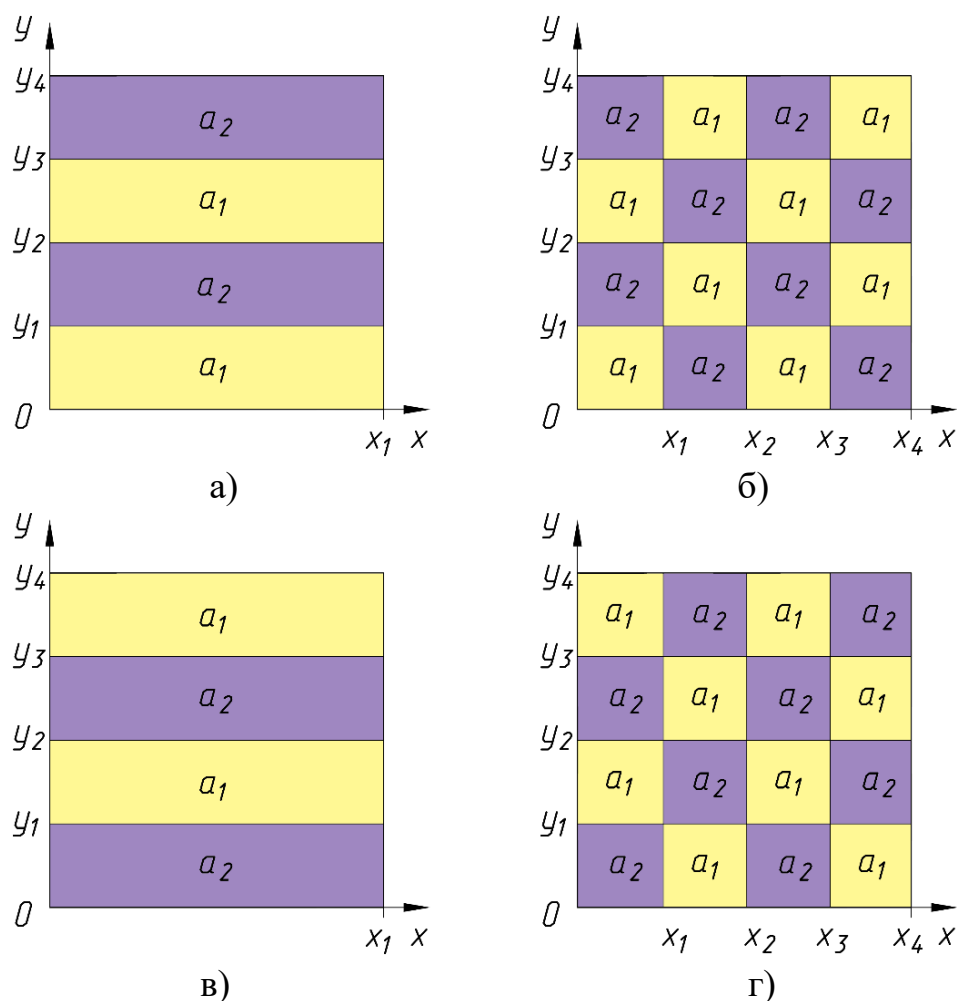


Рисунок 2.4.1 – Распределение материалов в элементах: а) №1; б) №2; в) №3; г) №4

Толщины данных конструкций также составляют 20 мм при $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5$ и $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = y_5$.

Для проведения исследований повышения теплоизоляционных свойств конструкций по структуре распределения материалов в конструкции рассмотрена математическая постановка задачи, где область решения задачи показана на Рисунке 2.4.2.

Математическая постановка задачи данных исследований имеет вид, указанный далее.

1. Уравнение теплопроводности для рассматриваемых элементов:

– для элементов №1, 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, 0 < x < x_1. \end{array} \right. ; \quad (39)$$

– для элементов №2, 4:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_5}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_6}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_6}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_7}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_7}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_7}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_8}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_8}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_8}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_9}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_9}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_9}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{10}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{10}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{10}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{11}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{11}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \end{array} \right. \quad (40)$$

Продолжение (40)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_{12}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{12}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{12}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{13}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{13}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{13}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{14}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{14}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{14}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{15}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{15}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{15}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_{16}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{16}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{16}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, 0 < x < x_1, \end{array} \right.$$

где n – нумерация коэффициента температуропроводности материалов в элементе в соответствии с Рисунком 2.4.1 и Таблицей 2.3.1; 1, 2...16 – нумерация слоев материала.

2. Начальные условия имеют вид:

– для элементов №1, 3:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_1, 0 < y < y_4; \quad (41)$$

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_4, 0 < y < y_4; \quad (42)$$

3. На границе $y = y_4$ для элементов №1-4 выполняется условие:

– для элементов №1, 3:

$$0 < x < x_1: T = T_b, t > 0; \quad (43)$$

– для элементов №2, 4:

$$0 < x < x_4: T = T_b, t > 0; \quad (44)$$

4. На границах $x = 0, x_1, x_4$ и $y = 0$ выполняется условие:

– для элементов №1, 3:

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (45)$$

$$x = x_1: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (46)$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (47)$$

– для элементов №2, 4:

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (48)$$

$$x = x_4: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (49)$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (50)$$

5. На границах между слоями $y = y_1, y_2, y_3$, и $x = x_1, x_2, x_3$ материалов выполняются условия:

– для элементов №1, 3:

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=y_1} ; \end{cases} \quad (51)$$

$$\begin{cases} T_2(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=y_2} = -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_2} ; \end{cases} \quad (52)$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_3} = -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=y_3} ; \end{cases} \quad (53)$$

– для элементов №2, 4:

– по оси y :

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_1 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases} ; \end{cases} \quad (54)$$

$$\begin{cases} T_2(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_2 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases} ; \end{cases} \quad (55)$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_3 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases} ; \end{cases} \quad (56)$$

$$\begin{cases} T_5(t, x, y) = T_6(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_5}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (57)$$

$$\begin{cases} T_6(t, x, y) = T_7(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_7}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (58)$$

$$\begin{cases} T_7(t, x, y) = T_8(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_7}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_8}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (59)$$

$$\begin{cases} T_9(t, x, y) = T_{10}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_9}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \quad (60)$$

$$\begin{cases} T_{10}(t, x, y) = T_{11}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \quad (61)$$

$$\begin{cases} T_{11}(t, x, y) = T_{12}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{12}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \quad (62)$$

$$\begin{cases} T_{13}(t, x, y) = T_{14}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{13}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{14}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (63)$$

$$\begin{cases} T_{14}(t, x, y) = T_{15}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{14}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{15}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (64)$$

$$\begin{cases} T_{15}(t, x, y) = T_{16}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{15}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{16}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (65)$$

– по оси x :

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_5(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_5}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_1 \\ 0 \leq y \leq y_1 \end{cases}; \quad (66)$$

$$\begin{cases} T_5(t, x, y) = T_9(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_5}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_9}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_2 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (67)$$

$$\begin{cases} T_9(t, x, y) = T_{13}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_9}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{13}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_3 \\ 0 \leq y \leq y_1 \end{cases}; \quad (68)$$

$$\begin{cases} T_2(t, x, y) = T_6(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_1 \\ y_1 \leq y \leq y_2 \end{cases}; \quad (69)$$

$$\begin{cases} T_6(t, x, y) = T_{10}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_2 \\ y_1 \leq y \leq y_2 \end{cases}; \quad (70)$$

$$\begin{cases} T_{10}(t, x, y) = T_{14}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{14}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_3 \\ y_1 \leq y \leq y_2 \end{cases}; \quad (71)$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_7(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_7}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_1 \\ y_2 \leq y \leq y_3 \end{cases}; \quad (72)$$

$$\begin{cases} T_7(t, x, y) = T_{11}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_7}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_2 \\ y_2 \leq y \leq y_3 \end{cases}; \quad (73)$$

$$\begin{cases} T_{11}(t, x, y) = T_{15}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{15}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_3 \\ y_2 \leq y \leq y_3 \end{cases}; \quad (74)$$

$$\begin{cases} T_4(t, x, y) = T_8(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_8}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_1 \\ y_3 \leq y \leq y_4 \end{cases}; \quad (75)$$

$$\begin{cases} T_8(t, x, y) = T_{12}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_8}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{12}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_2 \\ y_3 \leq y \leq y_4 \end{cases}; \quad (76)$$

$$\begin{cases} T_{12}(t, x, y) = T_{16}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{12}}{\partial x} = -\lambda_n \frac{\partial T_{16}}{\partial x}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} x = x_3 \\ y_3 \leq y \leq y_4 \end{cases}; \quad (77)$$

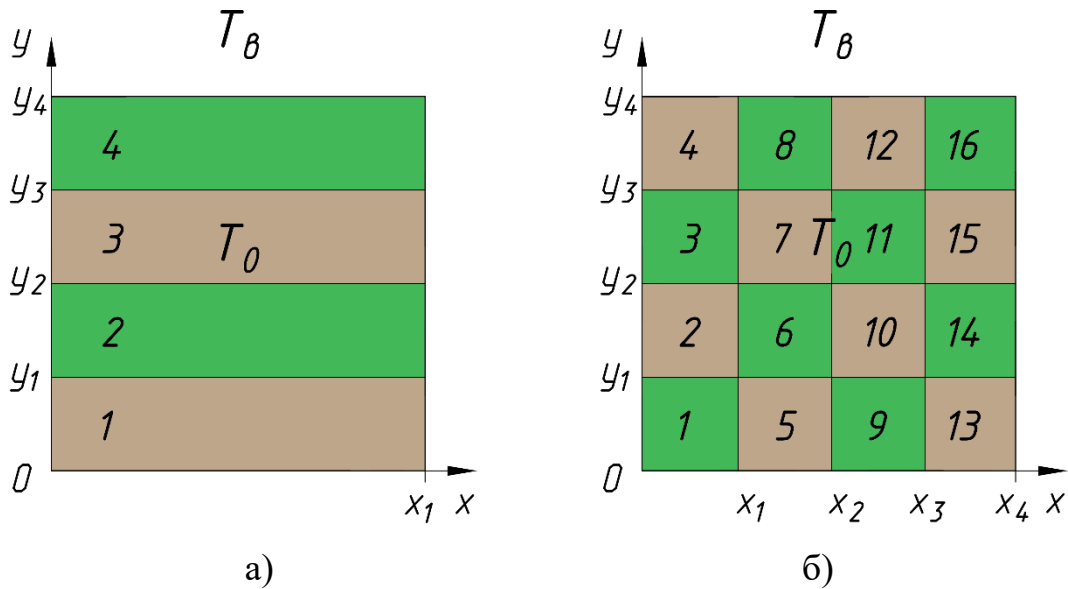


Рисунок 2.4.2 – Области решения задач для элементов: а) №1, 3; б) №2, 4

Краевая задача для уравнений (39), (40) с учетом начальных и граничных условий (41) – (77) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнений (39), (40) применялась локально-одномерная схема Самарского [86].

Результаты исследования теплопроводности конструкций представлены на Рисунках 2.4.3, 2.4.4.

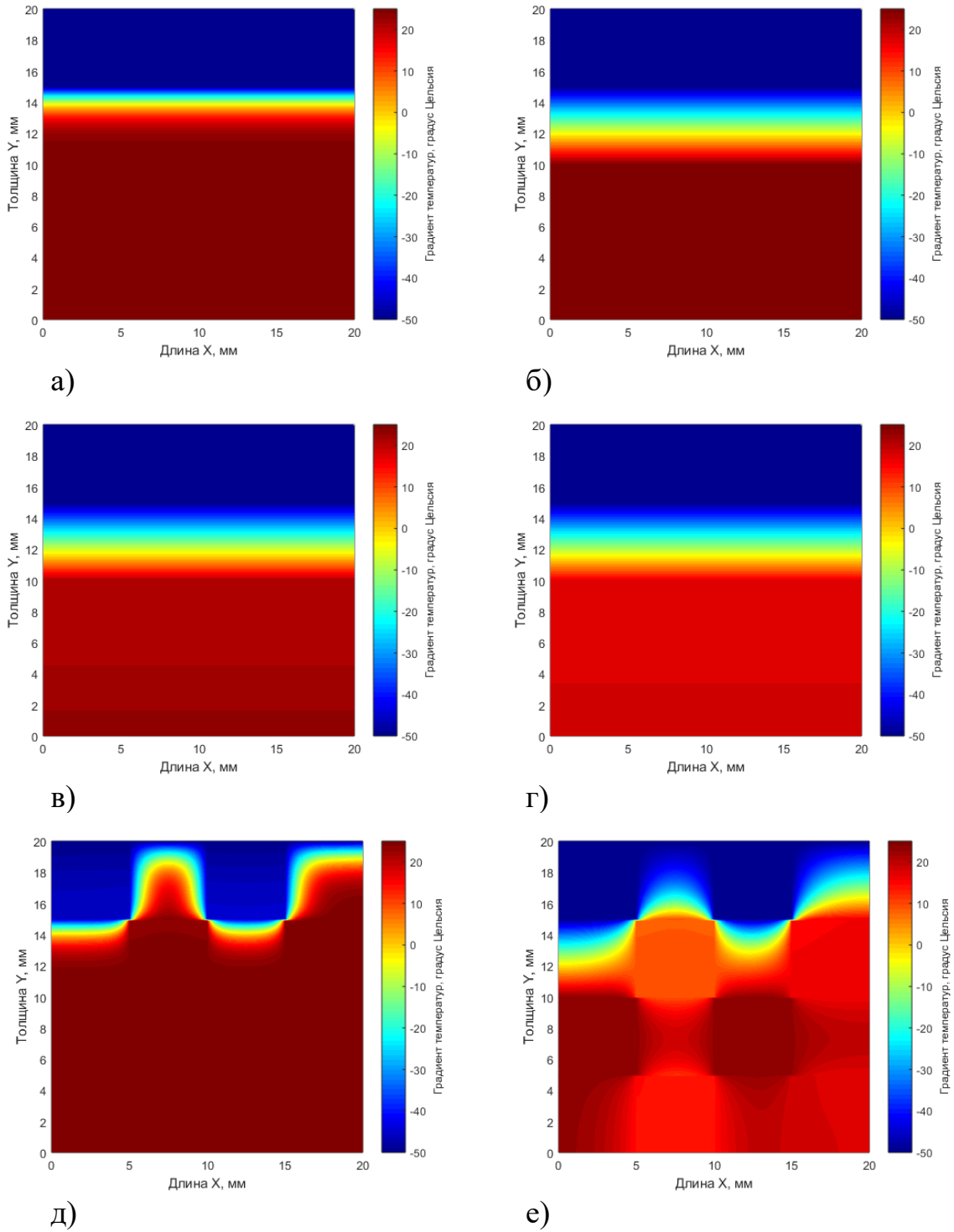


Рисунок 2.4.3 – Результаты исследования теплопроводности элементов №3, №4 за время воздействия температуры: а), д) 10 с; б), е) 100 с; в), ж) 300 с; г), з) 600 с

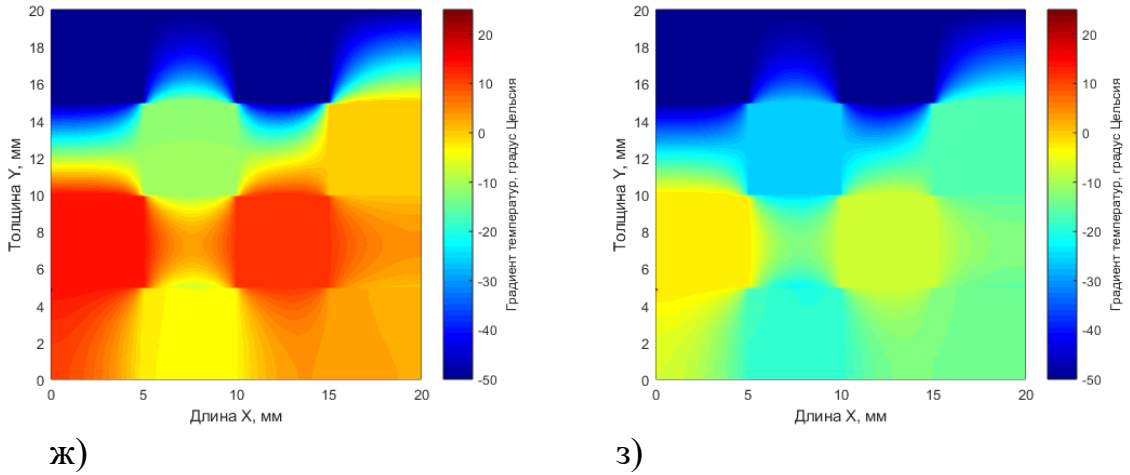


Рисунок 2.4.3 (продолжение) – Результаты исследования теплопроводности элементов №3, №4 за время воздействия температуры: а), д) 10 с; б), е) 100 с; в), ж) 300 с; г), з) 600 с

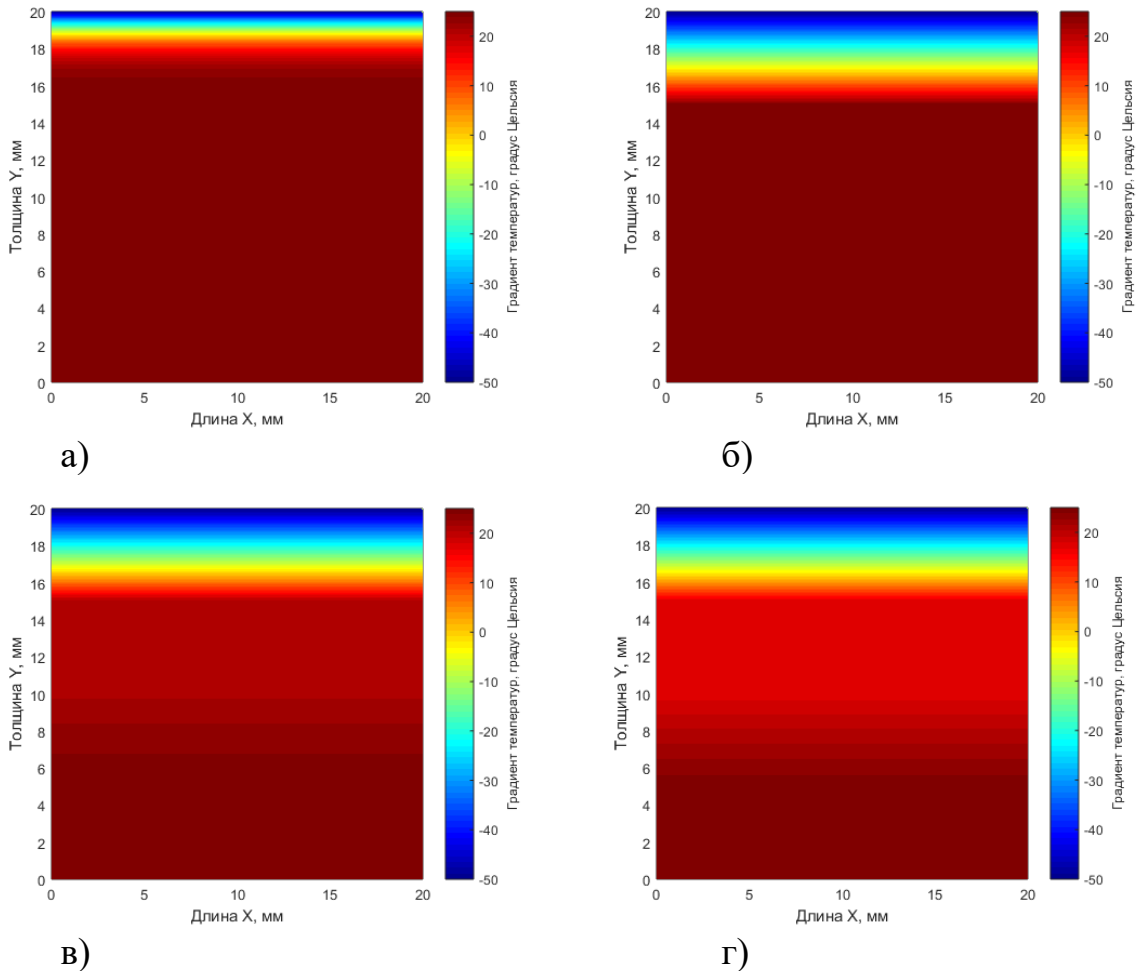
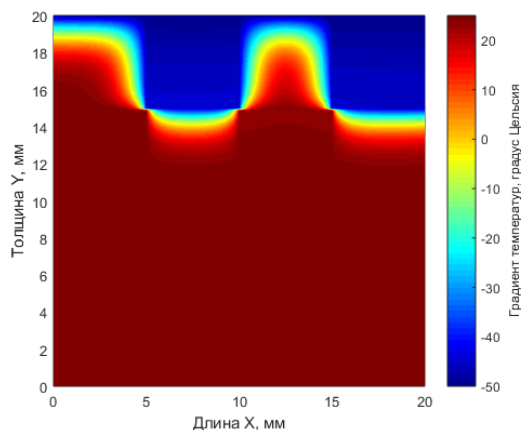
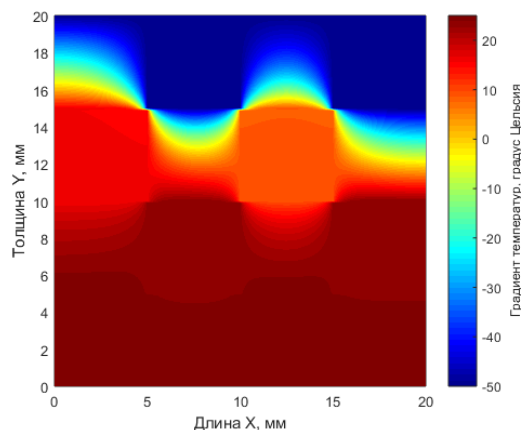


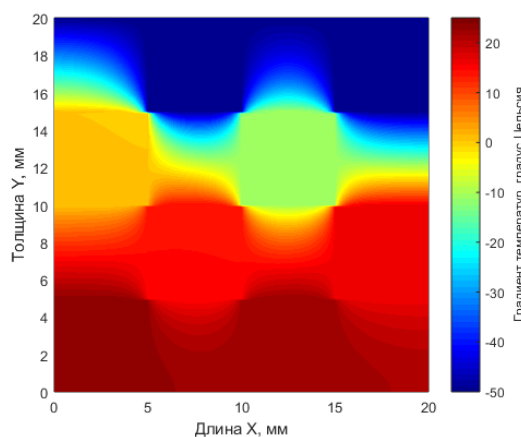
Рисунок 2.4.4 – Результаты исследования теплопроводности элементов №1, №2 за время воздействия температуры: а), д) 10 с; б), е) 100 с; в), ж) 300 с; г), з) 600 с



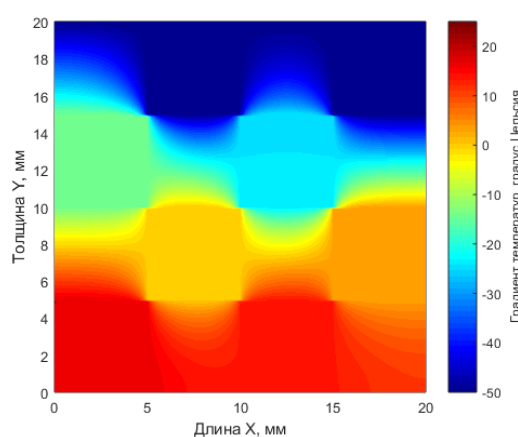
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 2.4.4 (продолжение) – Результаты исследования теплопроводности элементов №1, №2 за время воздействия температуры: а), д) 10 с; б), е) 100 с; в), ж) 300 с; г), з) 600 с

Результаты исследования теплопроводности элементов при временном воздействии температуры, представленные на Рисунках 2.4.3, 2.4.4 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 плюс 16°C до плюс 11°C , что в 1,5 – 2 меньше элемента №1. Элемент №4 на границе $y = 0$ имеет температуру равную от минус 6°C до минус 14°C , что в 4 – 3,2 меньше элемента №3.

2.5 Повышение теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА по конструктиву

В данном разделе рассматривается вопрос конструктива (компоновки) БПЛА, обеспечивающего высокие теплоизоляционные свойства без средств теплоизоляции. Исследование по определению компоновки, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции, проводилось в работе [87].

Под конструктивом будет пониматься распределение общего объёма занимаемой техникой и газом, находящиеся во внутренней части корпуса БПЛА. Поскольку конкретных объектов в виде БПЛА мы не рассматриваем, то геометрия БПЛА будет иметь форму цилиндра. И поскольку длину мы тоже не рассматриваем, вследствие чего будем рассматривать сечение в виде круга.

Для решения вопроса конструктива БПЛА обеспечивающего высокие теплоизоляционные свойства без теплоизоляционных средств защиты проведём исследования теплообмена сечения БПЛА с вариацией занимаемых площадей техники и газа в корпусе БПЛА. Постановка задачи представлена на Рисунке 2.5.1 и в Таблице 2.5.1.

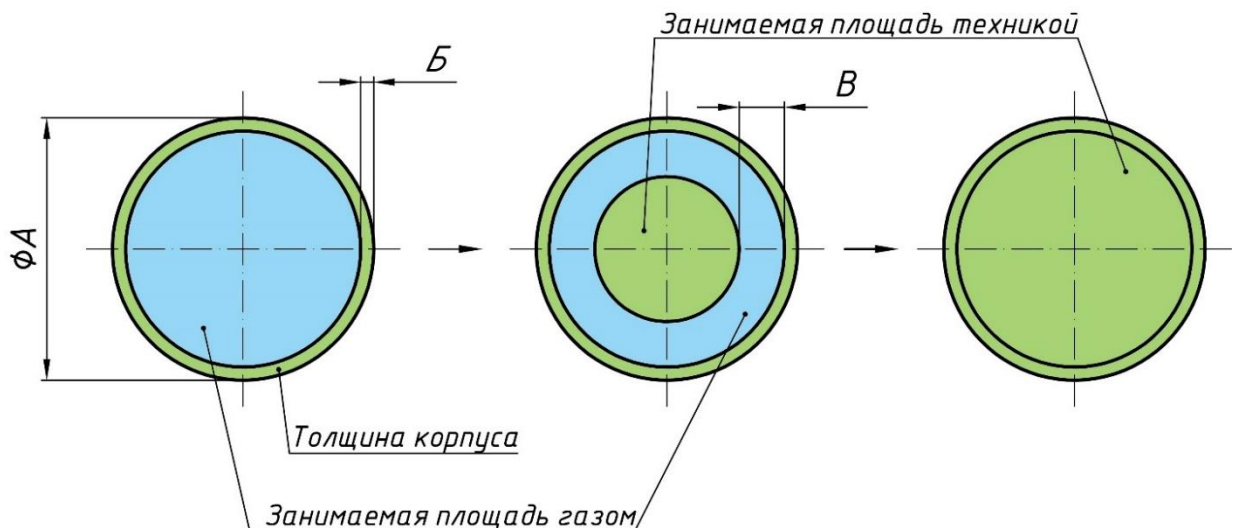


Рисунок 2.5.1 – Постановка задачи с вариацией занимаемых площадей и габаритными размерами

Таблица 2.5.1 – Значения габаритных размеров сечений

Варианты компоновки площадей №	Размеры, мм								
	А	В	А	В	А	В	А	В	Б
1	100	50	200	100	300	150	500	250	3
2		45		80		120		220	
3		40		60		100		180	
4		35		50		80		120	
5		30		40		60		60	
6		25		30		40		40	
7		20		20		20		20	
8		18		18		18		18	
9		16		16		16		16	
10		14		14		14		14	
11		12		12		12		12	
12		10		10		10		10	
13		8		8		8		8	
14		6		6		6		6	
15		4		4		4		4	
16		2		2		2		2	
17		1		1		1		1	
18		0		0		0		0	

Следует отметить, что в данной постановке задачи рассматривается средняя толщина занимаемого газа (размер В) между корпусом и техникой, поскольку геометрия площади, занимаемая техникой в корпусе агрегата, может быть разная (Рисунок 2.5.2).

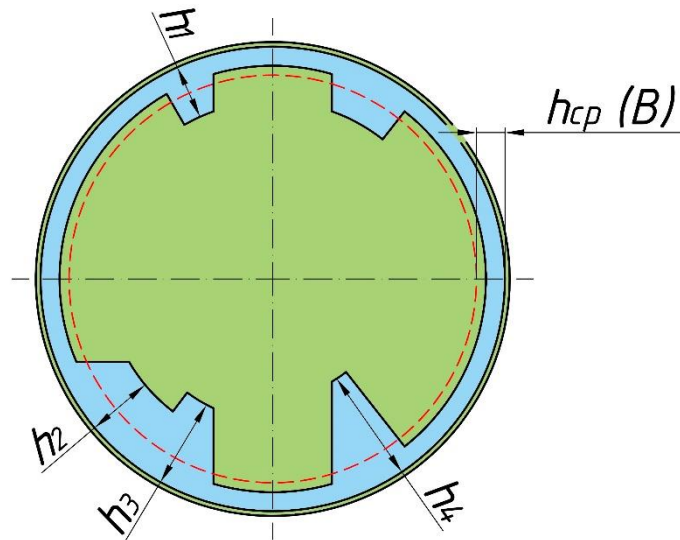


Рисунок 2.5.2 – Геометрия компоновки агрегата

Исследование нестационарного сопряжённого теплопереноса агрегатов БПЛА проводится при воздействии температуры T_1 абсолютного минимума, возможной в климатических условиях – минус 50°C .

Значение начальной температуры сечений T_0 задаётся плюс 25°C . Время воздействия температуры T_1 составляет 1 час.

Теплофизические характеристики корпуса и занимаемой площади в виде техники будут иметь значения алюминий-магниевого сплава. А именно: коэффициент теплопроводности λ_1 равен $122 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; плотность ρ_1 равна $2640 \text{ кг}/\text{м}^3$; удельная теплоёмкость Cp_1 равна $922 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$. В качестве газа рассматривается воздух, теплофизические характеристики имеют значения: коэффициент теплопроводности λ_2 равен $0,022 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; плотность ρ_2 равна $1 \text{ кг}/\text{м}^3$; удельная теплоёмкость Cp_2 равна $1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Математическая постановка задачи имеет вид, где области решения задачи показаны на Рисунке 2.5.2.

Для газовой области уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_r \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} + \frac{\omega}{r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) \\ + \beta g \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \sin \varphi - r \frac{\partial T}{\partial r} \cos \varphi \right), \end{aligned} \quad (78)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} = \omega. \quad (79)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{uT}{r} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right). \quad (80)$$

Для твердого тела уравнение имеет вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (81)$$

Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < r < r_1, r_2, r_3 \quad 0 \leq \varphi \leq \pi; \quad (82)$$

$$t = 0: \psi = 0, 0 < r < r_1, r_2, r_3 \quad 0 \leq \varphi \leq \pi; \quad (83)$$

$$t = 0: \omega = 0, 0 < r < r_1, r_2, r_3 \quad 0 \leq \varphi \leq \pi; \quad (84)$$

На границах $r = r_1, r_2, r_3$ выполняется условие:

$$r = r_1, r_2, r_3: T = T_1, t > 0; \quad (85)$$

На границах раздела твердого материала и газа $r = r_1, r_2$:

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \psi = 0; \quad (86)$$

– для компоновки БПЛА №1:

$$\begin{cases} T_1(t, r, \varphi) = T_2(t, r, \varphi), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \end{cases}; \quad (87)$$

– для компоновки БЛА №2:

$$\begin{cases} T_1(t, r, \varphi) = T_2(t, r, \varphi), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \end{cases}; \quad (88)$$

$$\begin{cases} T_2(t, r, \varphi) = T_3(t, r, \varphi), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2} \end{cases}. \quad (89)$$

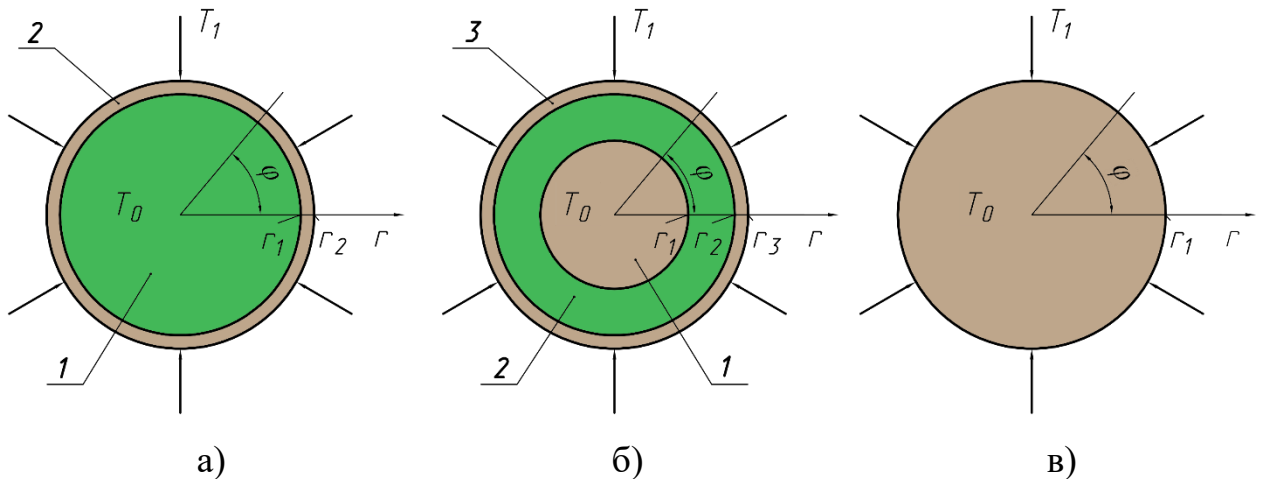


Рисунок 2.5.3 – Области решения задачи для компоновки БПЛА: а) №1; б) №2; в) №3

Краевая задача для уравнений (78) – (81) с учетом начальных и граничных условий (82) – (92) решалась конечно-разностным методом на

равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнений (78) – (81) применялась локально-одномерная схема Самарского [86].

Результаты исследований теплообмена рассматриваемых агрегатов БПЛА представлены на Рисунках 2.5.4 - 2.5.5, которые показывают, что:

1) Для сечения диаметром 100 мм максимальное значение температуры, которой составляет минус 5°C , возникает при толщинах занимаемым газом 6-10 мм. Минимальное значение температуры минус 50°C имеет сечение, где толщина, занимаемая газом, отсутствует.

2) Для сечения диаметром 200 мм максимальное значение температуры, которой составляет плюс 6°C , возникает при толщинах, занимаемых газом 6-12 мм. Минимальное значение температуры минус 46°C имеет сечение, где толщина, занимаемая газом, отсутствует или всю площадь сечения занимает газ.

3) Для сечения диаметром 300 мм максимальное значение температуры, которой составляет плюс 13°C , возникает при толщинах, занимаемых газом 6-14 мм. Минимальное значение температуры минус 43°C имеет сечение, где всю площадь сечения занимает газ.

4) Для сечения диаметром 500 мм максимальное значение температуры, которой составляет плюс 20°C , возникает при толщинах, занимаемых газом 6-20 мм. Минимальное значение температуры минус 34°C имеет сечение, где всю площадь сечения занимает газ.

5) Следует отметить, что 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 (Рисунок 2.5.5).

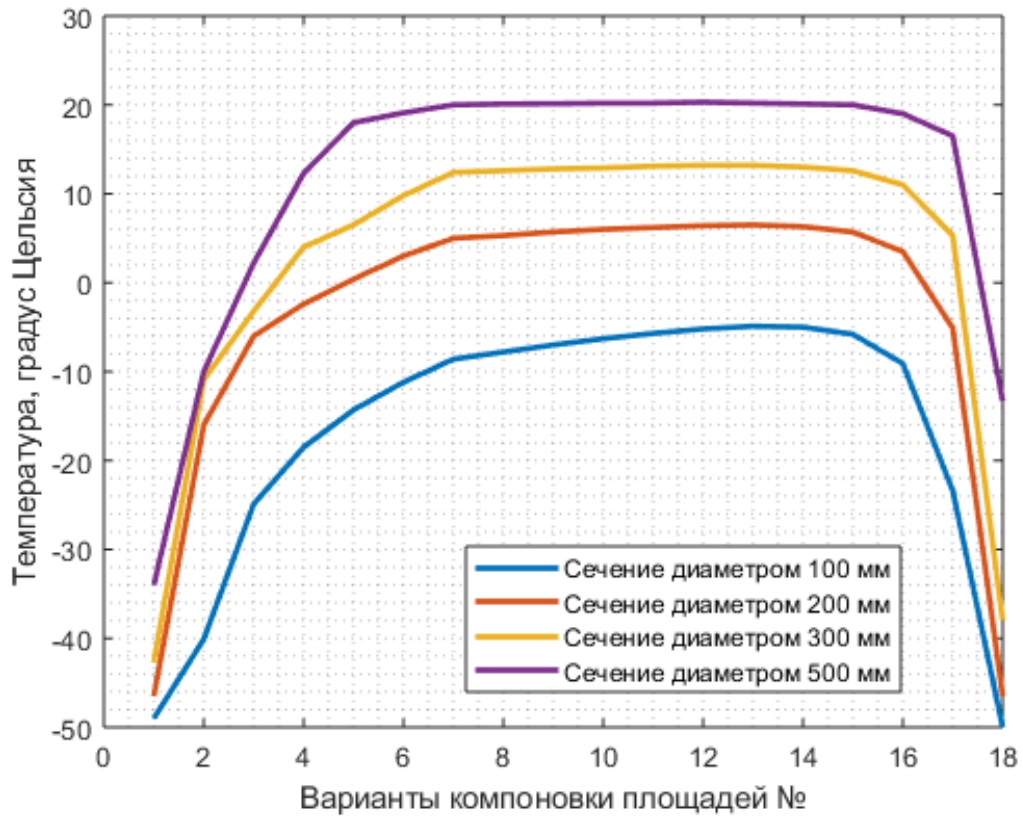


Рисунок 2.5.4 – Зависимость возникающей температуры в БПЛА относительно его компоновки при воздействии отрицательной температуры

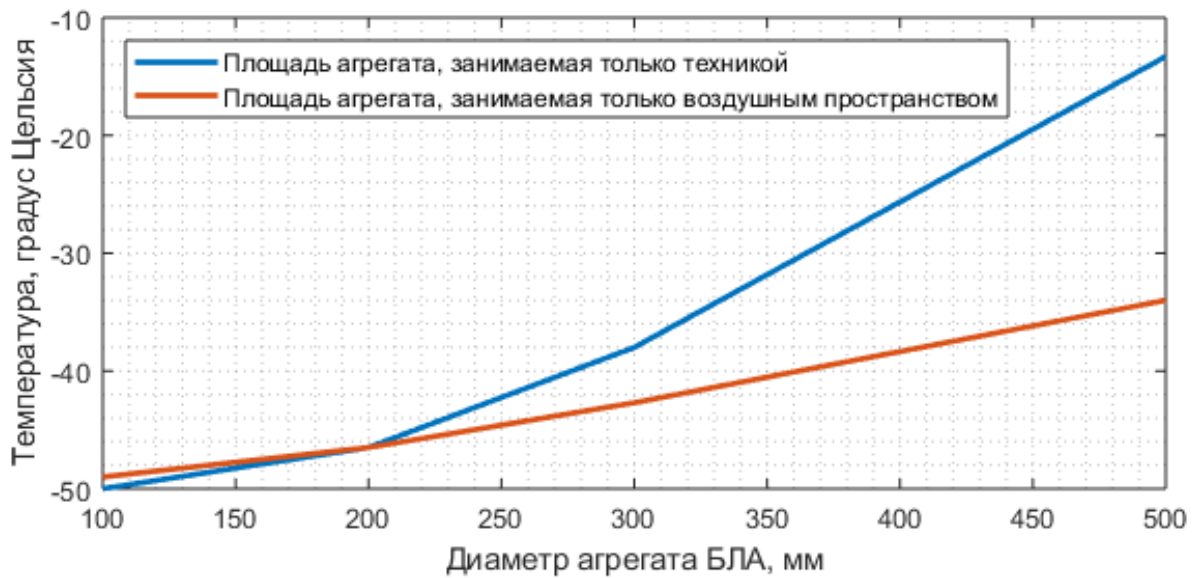


Рисунок 2.5.5 – Зависимость диаметра агрегата БПЛА различного сечения от полученных в них температур при воздействии отрицательной температуры

Заключение по главе 2

По результатам проведённых исследований были определены следующие принципы проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций:

1. Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по характеристикам теплопроводности материалов характеризуется не только минимальным показателем коэффициента теплопроводности, но и плотностью (удельная теплоёмкость в повышении свойств теплоизоляции не рассматривается вследствие того, что производить материал с заданной плотностью гораздо проще). Чем больше отношение показателя коэффициента теплопроводности материала к произведению удельной теплоёмкости и плотности материала, тем выше показатели теплоизоляции материала. Следовательно, введение газов и материалов, обладающих низкой плотностью, не является наиболее эффективным видом теплоизоляции.

2. Повышение теплоизоляционных свойств конструкций по взаимодействию материалов между собой характеризуется введением высоко проводимых слоёв материалов, характеризующихся высокой плотностью. Необходимо, чтобы слой материала, на который непосредственно происходит воздействие температуры, имел низкие показатели теплопроводности.

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

4. Повышение теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА без теплоизоляционных средств защиты характеризуется компоновкой площадей, занимаемых газом и аппаратурой. Для повышения теплоизоляционных свойств агрегатов БПЛА без теплоизоляционных средств защиты необходимо чтобы толщина, занимаемая газом между корпусом и

аппретурой БПЛА, составляла 6-10 мм. Причём при больших диаметрах данная толщина может быть увеличена до 20 мм и более в зависимости от диаметра сечения БПЛА.

Показатели теплоизоляции агрегата, где площадь сечения занимает воздушное пространство, падают с увеличением диаметра агрегата относительно агрегата с сечением, занимаемым техникой при воздействии температур.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ БПЛА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

3.1 Концепция разработанной теплоизоляционной конструкции

Концепция разрабатываемой теплоизоляционной конструкции (КТИ) основана на принципах проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций, описание которых изложено во второй главе диссертационной работы. КТИ представлена на Рисунке 3.1.1.

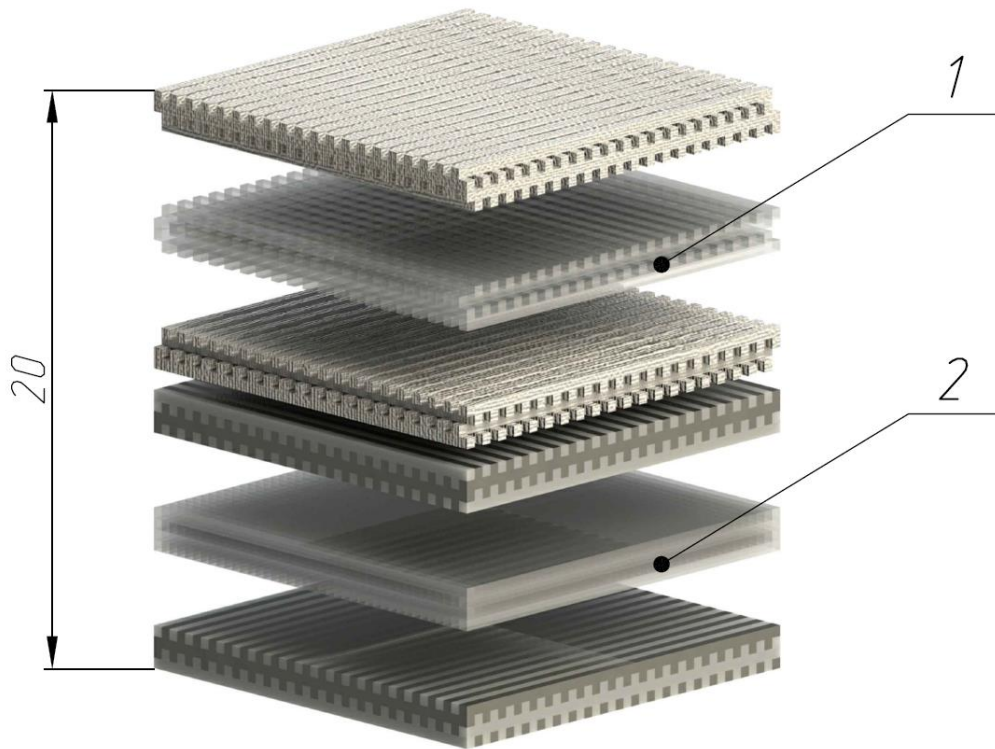


Рисунок 3.1.1 – Разработанная теплоизоляционная конструкция

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

Обоснование такого решения КТИ обуславливается факторами конструктивности и вариации теплофизических характеристик материалов, участвующих в КТИ.

Под конструктивными факторами понимается то, что в КТИ принимаются материалы структура, которых армированная. Такое решение даёт возможность придать гибкость конструкции, что для конструкции, как средство теплоизоляции важно. Немало важным является то, что использование сетчатой и армированной структуры материалов даёт возможность выбора большого разнообразия существующего сортамента материалов с его вариацией характеристик необходимых для создания КТИ.

Под фактором вариации теплофизических характеристик материалов участвующие в КТИ понимается то, что для получения необходимых теплофизических характеристик материала участвующие в конструкции наиболее эффективным решением данной задачи является то, что материал должен иметь неоднородную структуру. То есть, подбор необходимых теплофизических характеристик с их вариациями при неоднородном материале является наиболее эффективным решением.

В КТИ рассматриваются материалы с двунаправленной прямоугольной схемой армирования, представленной на Рисунке 3.1.2. Исходя из этого, коэффициент теплопроводности материалов определялся по формуле [88]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[m_2^2 \nu + (1 - m_2)^2 + \frac{4\nu m_2 (1 - m_2)}{1 + \nu} \right], \quad (90)$$

где λ_1 – теплопроводность волокон, m_2 – пористость армируемого материала, $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$, а λ_2 – теплопроводность вещества пор.

Плотность материала определялся по формуле [88]:

$$\rho = \rho_2 m_2 + \rho_1 (1 - m_2), \quad (91)$$

где ρ_1 – плотность волокна, ρ_2 – плотность вещества пор.

Аналогично определялась удельная теплоёмкость материала:

$$c = c_2 m_2 + c_1 (1 - m_2), \quad (92)$$

где c_1 – удельная теплоёмкость волокна, c_2 – удельная теплоёмкость вещества пор.

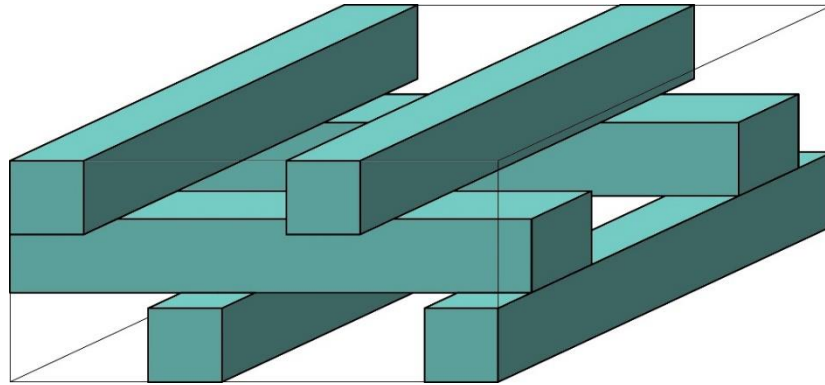


Рисунок 3.1.2 – Фрагмент материала с двунаправленной прямоугольной схемой армирования

Формирование предлагаемой КТИ определялось методом проектирования, путем проведения исследований теплопроводности различных КТИ при воздействии температуры $T_в$ минус 50°C и начальной температурой конструкций T_0 плюс 25°C . Время воздействия температуры внешней среды $t = 2$ часа. Толщина предлагаемой конструкции равна 20 мм. Теплофизические характеристики КТИ брались из Таблицы 3.1.1 [89-92]. Схема формирования КТИ представлена на рисунке 3.1.3.

Таблица 3.1.1. – Теплофизические характеристики исходных материалов для неоднородных материалов

Неоднородный материал	Пористость армируемого материала	Исходные материалы и компоненты	Характеристики		
			Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$
1 – Металлическая сетка	0,3	Углеродистая сталь	7800	480	13
		Герметик	1750	3000	0,26
2 – Стеклоткань	0,2	Стекловолокно	2480	840	0,031
		Воздух	1	1000	0,022

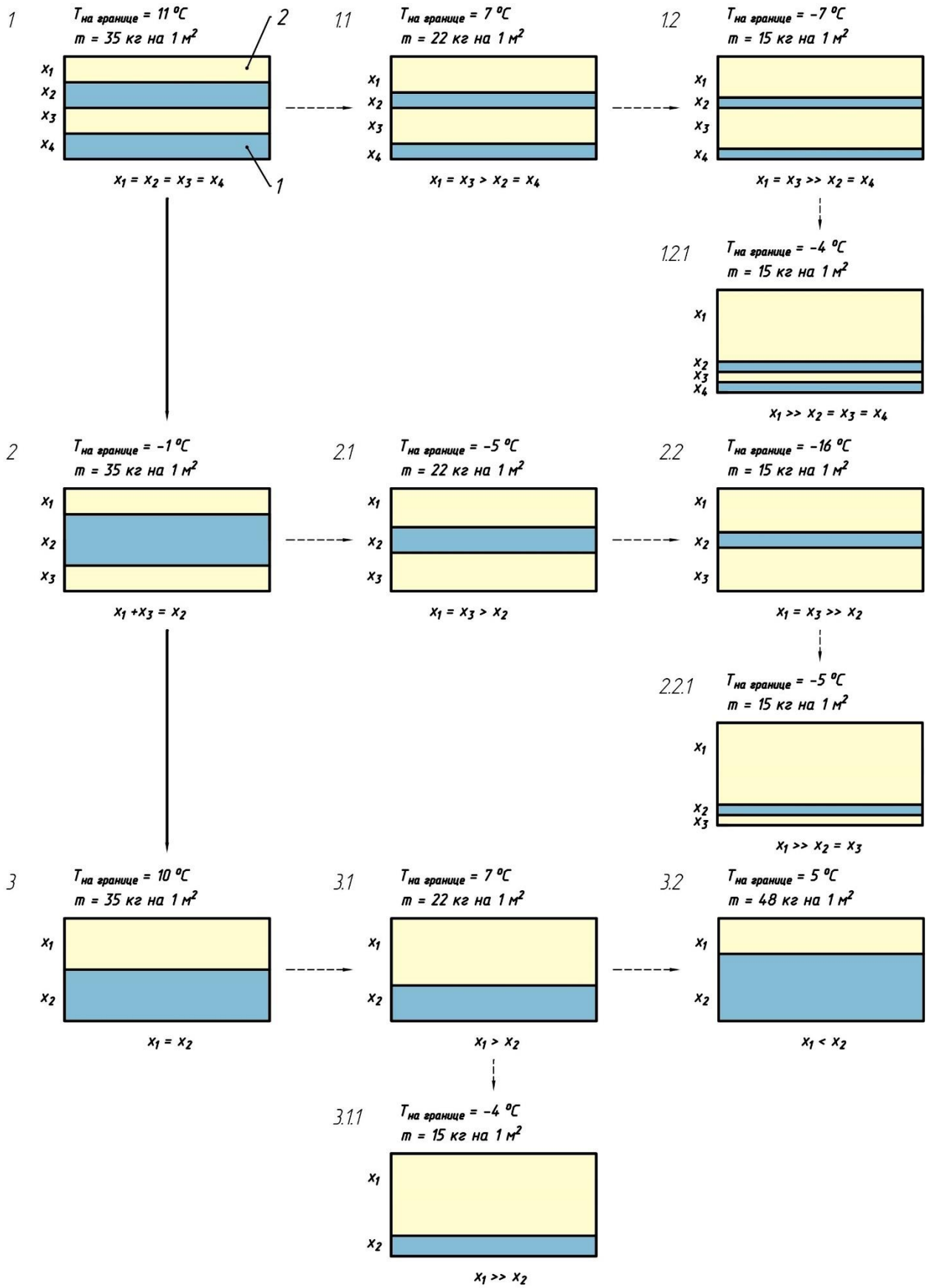


Рисунок 3.1.3 – Схема формирования предлагаемой КТИ

Исследования теплопроводности КТИ (Рисунок 3.1.3) показывают, что наиболее оптимальным вариантом по массе, теплоизоляции и конструктиву КТИ является конструкция под № 3.1.1.

Для получения более высоких показателей теплоизоляции конструкции № 3.11 проведены исследования теплопроводности данной КТИ с вариацией теплофизических характеристик стеклоткани и её толщины в конструкции. Исходные данные характеристик относительно пористости стеклоткани представлены в Таблице 3.1.2, где начальные значения характеристик и пористости стеклоткани взяты с Таблицы 3.1.1.

Таблица 3.1.2 – Вариация теплофизических характеристик относительно пористости стеклоткани

№ конструкции	Пористость стеклоткани	Характеристики		
		Плотность, кг/м ³	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	0,2	500	968	0,0236
2	0,18	450	971	0,0234
3	0,16	400	974	0,0232
4	0,14	350	977	0,0231
5	0,12	300	980	0,0229
6	0,1	250	984	0,0228
7	0,08	200	987	0,0226

Результаты теплопроводности конструкций (схема укладки слоёв стеклоткани и металлической сетки представлена на Рисунке 3.1.3) с вариацией теплофизических характеристик относительно пористости стеклоткани и толщин материалов представлены на Рисунке 3.1.4.

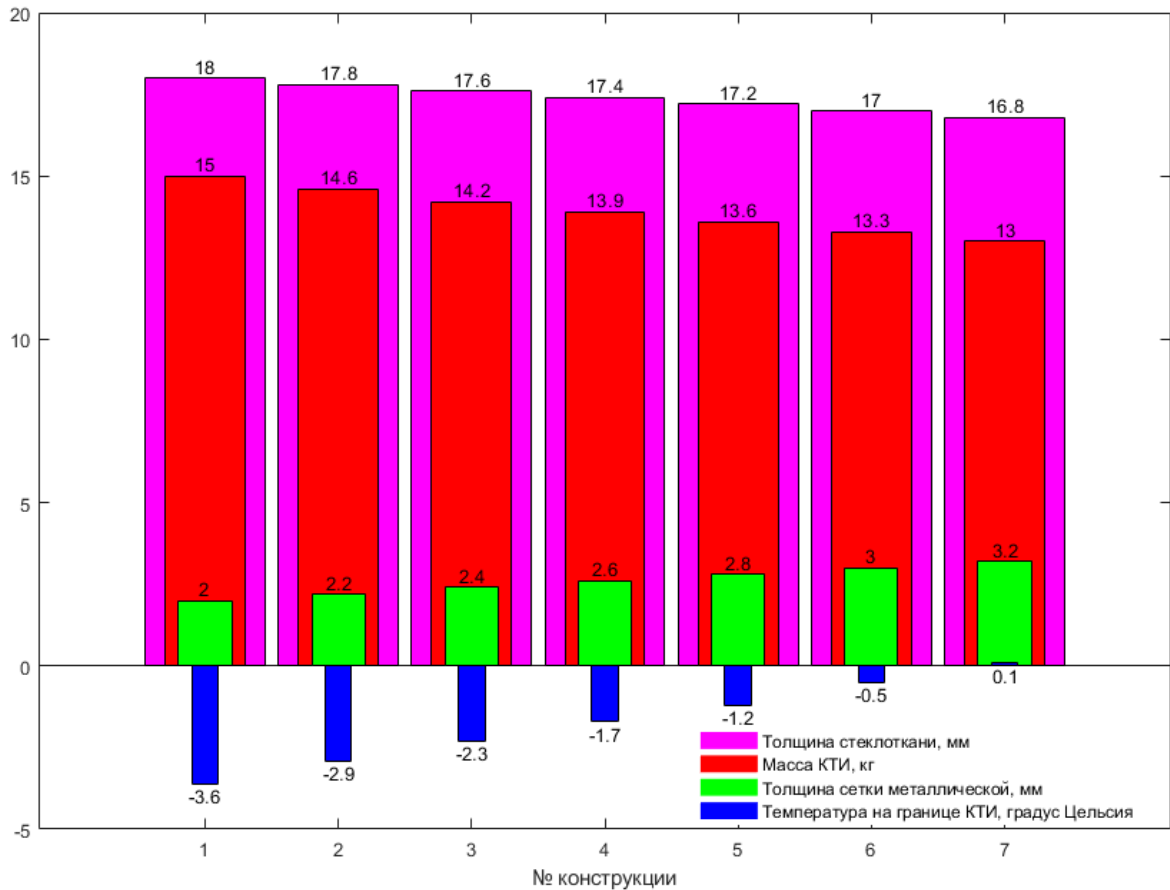


Рисунок 3.1.4 – Результаты теплопроводности конструкций с вариацией теплофизических характеристик относительно пористости стеклоткани и толщин материалов

Результаты, представленные на Рисунке 3.1.4, показывают, что при вариации теплофизических характеристик относительно пористости стеклоткани и толщин материалов, участвующие в КТИ наилучшие показатели теплоизоляции, имеет конструкция №7 с показателями: толщины металлической сетки равной 3,2 мм; толщины стеклоткани равной 16,8 мм. В данной конструкции при временном воздействии температуры минус 50 °С за 2 часа опустилась от температуры плюс 25 °С до 0,1°С. Данная конструкция имеет наименьшее значение массы на 1 м², а именно 13 кг.

Проведенные исследования применения такого типа конструкции в качестве эффективной теплоизоляции отражаются в работе [93].

3.2 Сравнительный анализ теплоизоляционных конструкций для применения в БПЛА

В данном разделе проводятся исследования теплопроводности КТИ, используемых в авиастроении с КТИ спроектированной на основе принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций. В качестве современных КТИ в диссертационной работе рассматриваются именно слои теплоизоляционных материалов в конструкции, а не вся конструкция поскольку, как было показано и сказано в разделе 1.4 первой главы, что КТИ содержит основной материал – теплоизоляционный или теплозвукоизолирующий, а все остальные слои имеют функцию наружного защитного покрытия и крепления.

Рассмотрим преимущества и недостатки конструкций, произведя исследования теплопроводности при двух условиях.

- 1) Исследования теплопроводности КТИ при постоянной толщине.
- 2) Исследования теплопроводности конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ.

В анализе определения преимуществ и недостатков теплоизоляционных конструкций, теплоизоляционные конструкции, рассматриваемые в качестве материала, имеют теплофизические характеристики, представленные в Таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – 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

Исследования теплопроводности проводятся при воздействии вынужденной конвекции α , значение которой равно $450 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ с температурой T_e внешней среды минус 50°C . Значение начальной температуры конструкций T_0 задаётся плюс 25°C . Время воздействия температуры внешней среды $t = 2$ часа. Толщина предлагаемой конструкции равна 20 мм .

Для исследования теплопроводности предлагаемой конструкции и материалов в условиях конвективного теплообмена принято допущение, что характеристики теплопроводности материалов являются постоянными в пределах заданных температурных условий.

Для проведения исследований нестационарной теплопроводности предлагаемой теплоизоляционной конструкции и материалов, участвующих в конструкции в качестве слоя теплоизоляции, рассмотрена математическая постановка задачи, где область решения задачи представлена на Рисунке 3.2.1:

Математическая постановка задачи данных исследований имеет вид, указанный далее.

1. Уравнение теплопроводности для рассматриваемых конструкций:

– для предлагаемой теплоизоляционной конструкции:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x_1 < x < x_2, \end{cases} \quad (93)$$

где 1, 2 – нумерация слоев материала;

– для теплоизоляционного слоя материала в конструкции:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < x_1. \end{cases} \quad (94)$$

2. Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_1, x_2. \quad (95)$$

3. Граничные условия имеют вид:

– на границе $x = x_1, x_2$ выполняется условие:

$$T = T_B, t > 0; \quad (96)$$

– на границе $x = 0$ выполняется условие

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (97)$$

– на границах между слоями материалов выполняется условие:

$$\begin{cases} T_1(t, x_1) = T_2(t, x_1), \\ -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=x_1} = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=x_1} \end{cases} \quad (98)$$

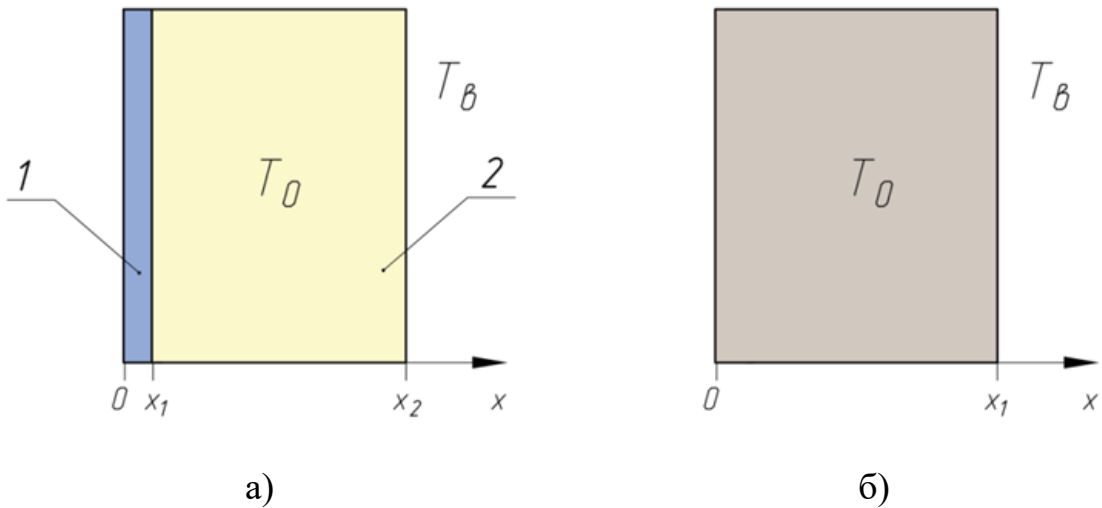
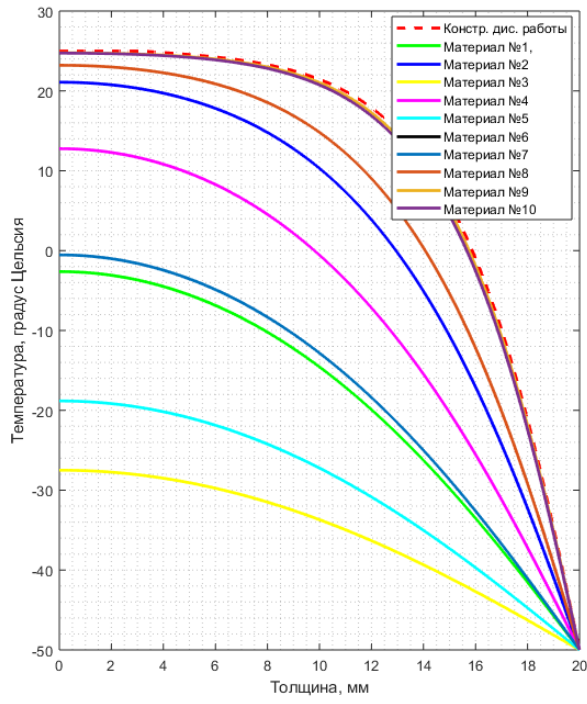


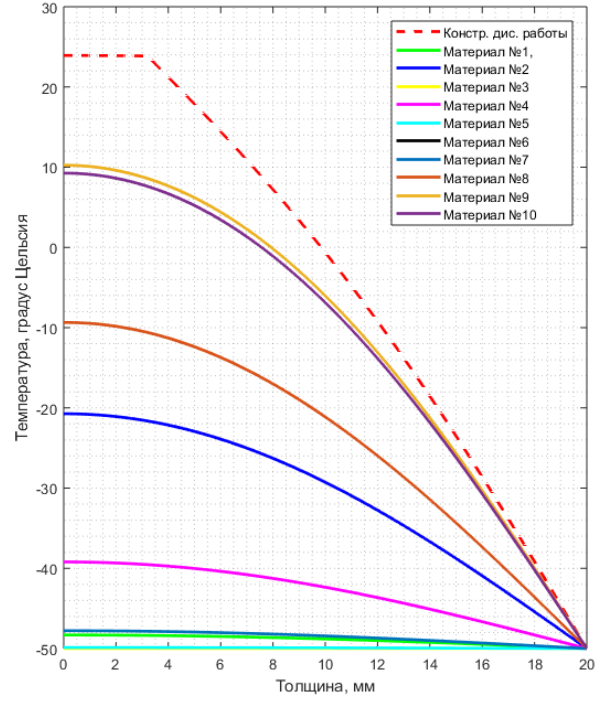
Рисунок 3.2.1 – Область решения задачи для: а) предлагаемой конструкции; б) материала

Краевые задачи для уравнений (93) и (94) с учетом начальных и граничных условий (95) – (98) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной схемы.

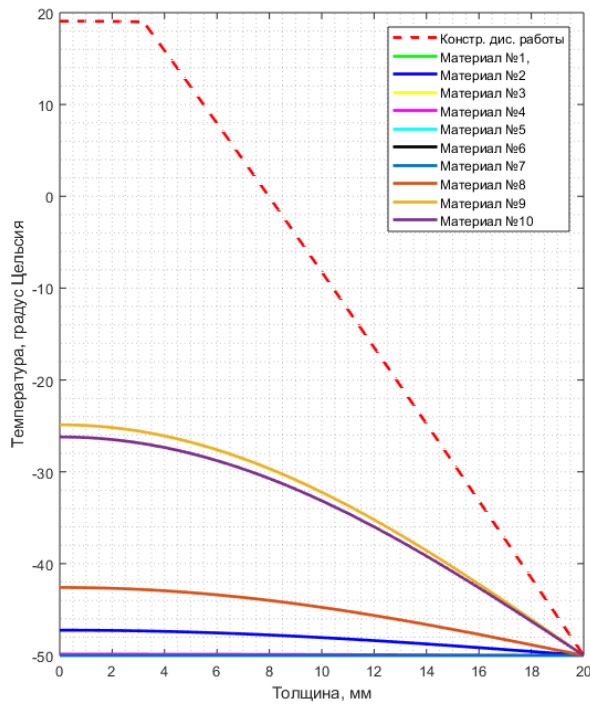
Исследования теплопроводности КТИ при постоянной толщине, равной 20 мм представлены на Рисунке 3.2.2.



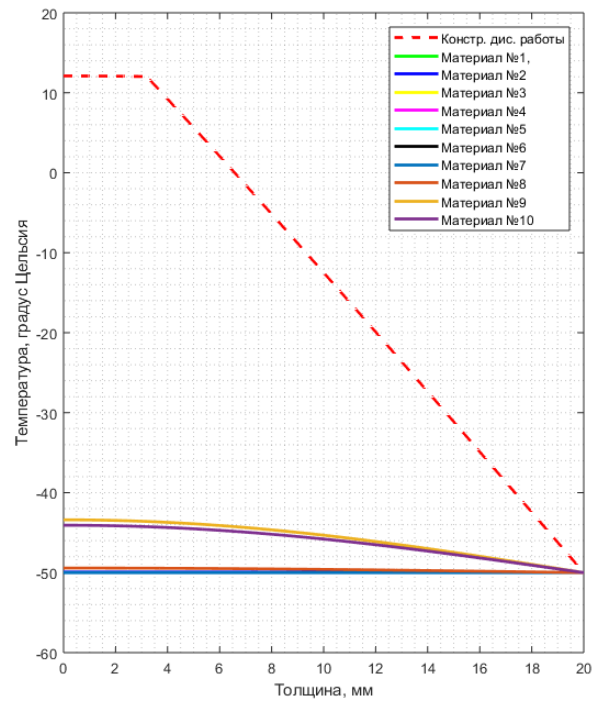
а)



б)

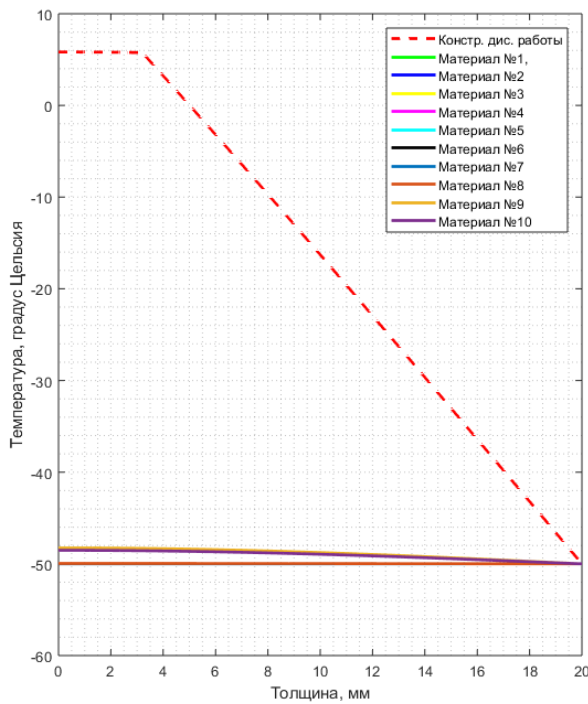


в)

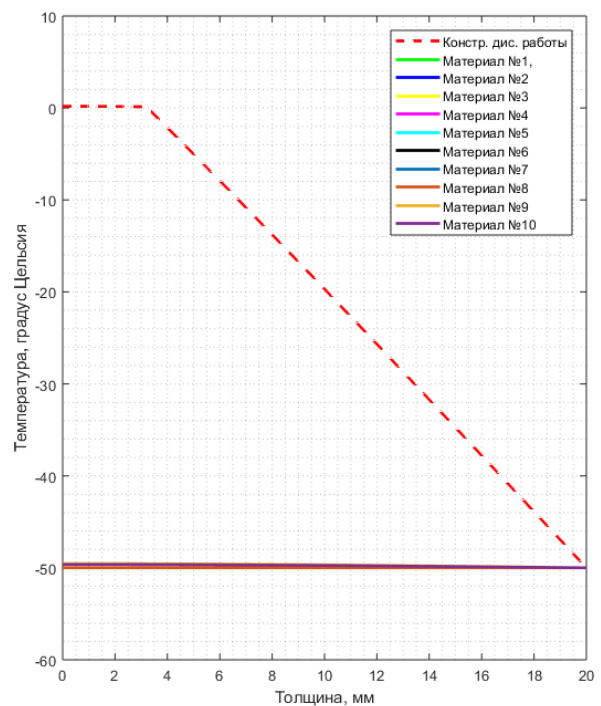


г)

Рисунок 3.2.2 – Результаты исследования теплопроводности конструкций при временном воздействии вынужденной конвекции: а) 60 с; б) 10 мин; в) 30 мин; г) 1 час; д) 1.5 часа; е) 2 часа



д)



е)

Рисунок 3.2.2 (продолжение) – Результаты исследования теплопроводности конструкций при временном воздействии вынужденной конвекции: а) 60 с; б) 10 мин; в) 30 мин; г) 1 час; д) 1.5 часа; е) 2 часа

Результаты исследования теплопроводности конструкций при воздействии вынужденной конвекции и при температуре внешней среды равной минус 50°C показывают, что наиболее высокие показатели теплоизоляции имеет конструкция, спроектированная по установленным принципам проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций. Температура данной конструкции, как и в предыдущем исследовании теплопроводности конструкций с вариацией теплофизических характеристик относительно пористости стеклоткани и толщин материалов, за время 2 часа опустилась от плюс 25°C до плюс 0.1°C . У всех остальных конструкций с материалами №1-10 температура опустилась за время 2 часа до минус 50°C .

Рассмотрим исследования теплопроводности конструкций при воздействии естественной конвекции α , значение которой составляет $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, где время воздействия температуры внешней среды $t = 2$ часа.

Результат исследования теплопроводности конструкций представлены на Рисунке 3.2.3.

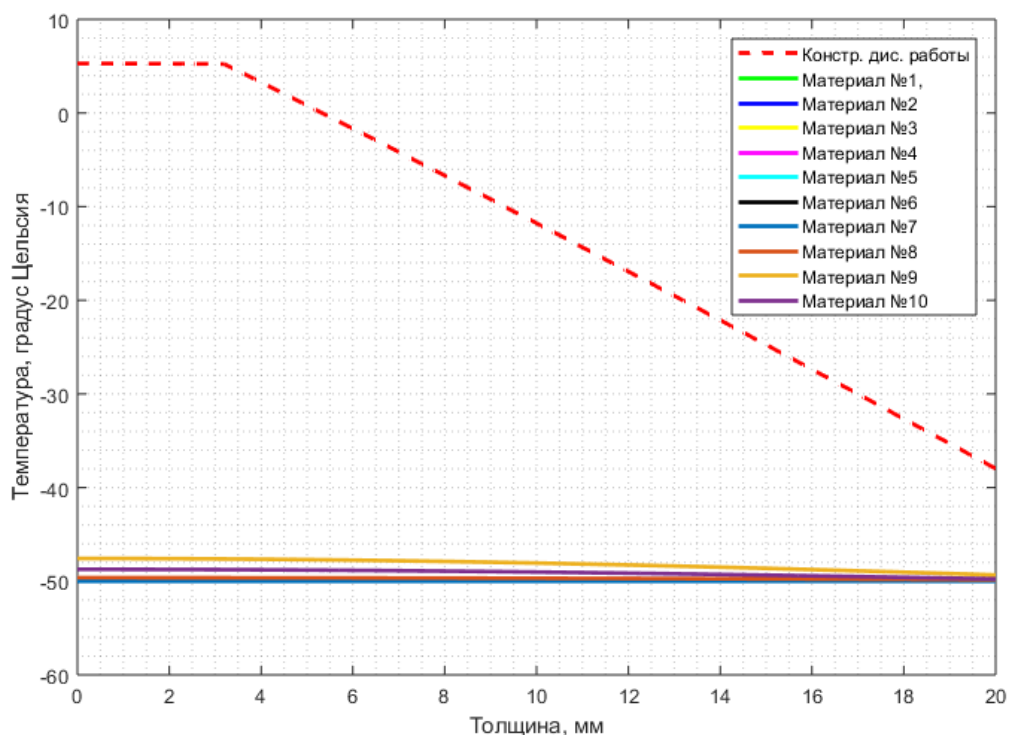


Рисунок 3.2.3 – Результат исследования теплопроводности конструкций при временном воздействии вынужденной конвекции 2 часа

Результат исследования теплопроводности конструкций при временном воздействии естественной конвекции 2 часа, при температуре внешней среды минус 50°C, показывают, что наилучший результат по теплоизоляции показывает предлагаемая конструкция. Ее температура опустилась от плюс 25°C до плюс 5°C. У конструкций с материалами №9, №10 температура опустилась за время 2 часа до минус 47 и 48°C. Остальные конструкции имеют температуру минус 50°C.

Проведём исследования теплопроводности конструкций при толщинах, необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ.

Результаты исследований теплопроводности конструкций при толщинах, необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ представлены на Рисунке 3.2.4.

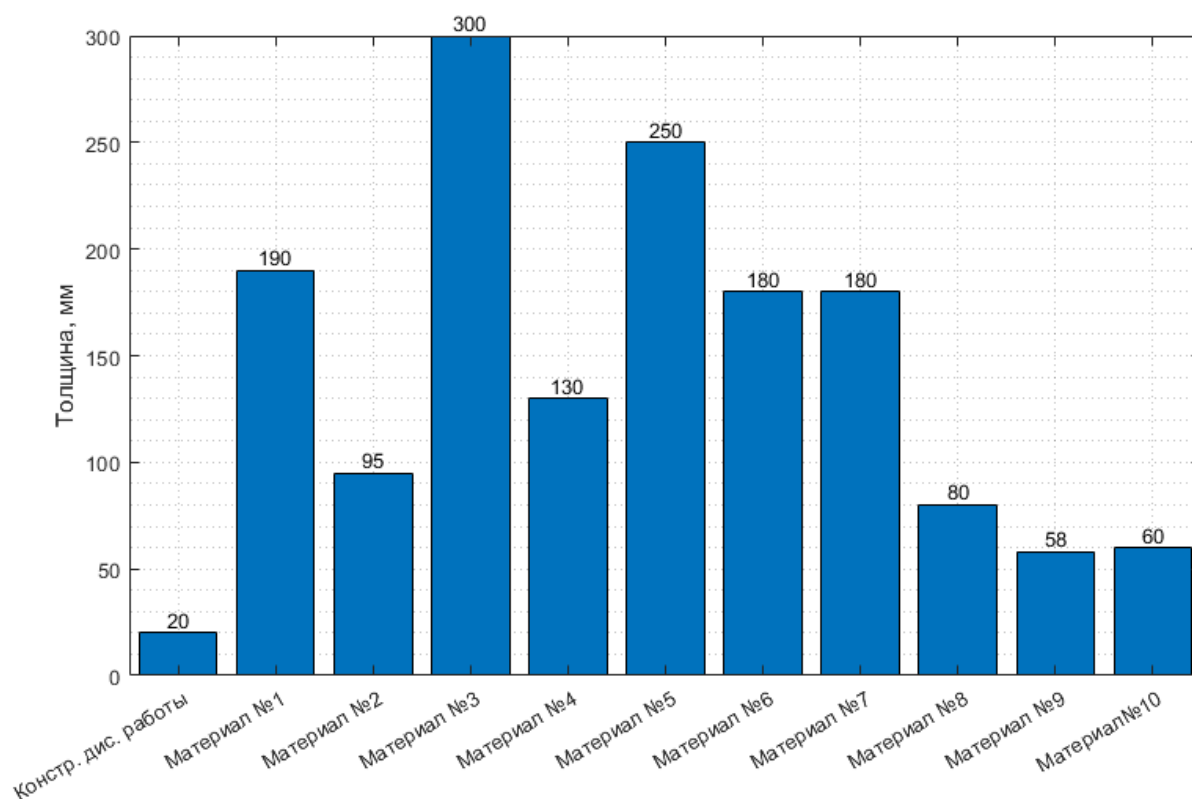


Рисунок 3.2.4 – Результаты исследований теплопроводности конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ

Результаты исследований показывают, что наибольшую толщину, необходимую для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ, имеет конструкция с материалом №3 (стекловата малой плотностью), толщина которой составляет 300 мм. А наименьшую толщину имеют конструкции с материалами №8, 9 (аэрогели), толщина которых составляет 58 и 60 мм. То есть, конструкция, спроектированная на основе установленных принципов, имеет преимущество по малой толщине в 3 раза.

Поскольку рассматриваются толщины КТИ, то необходимо рассмотреть и массы конструкций, которые представлены на Рисунке 3.2.5.

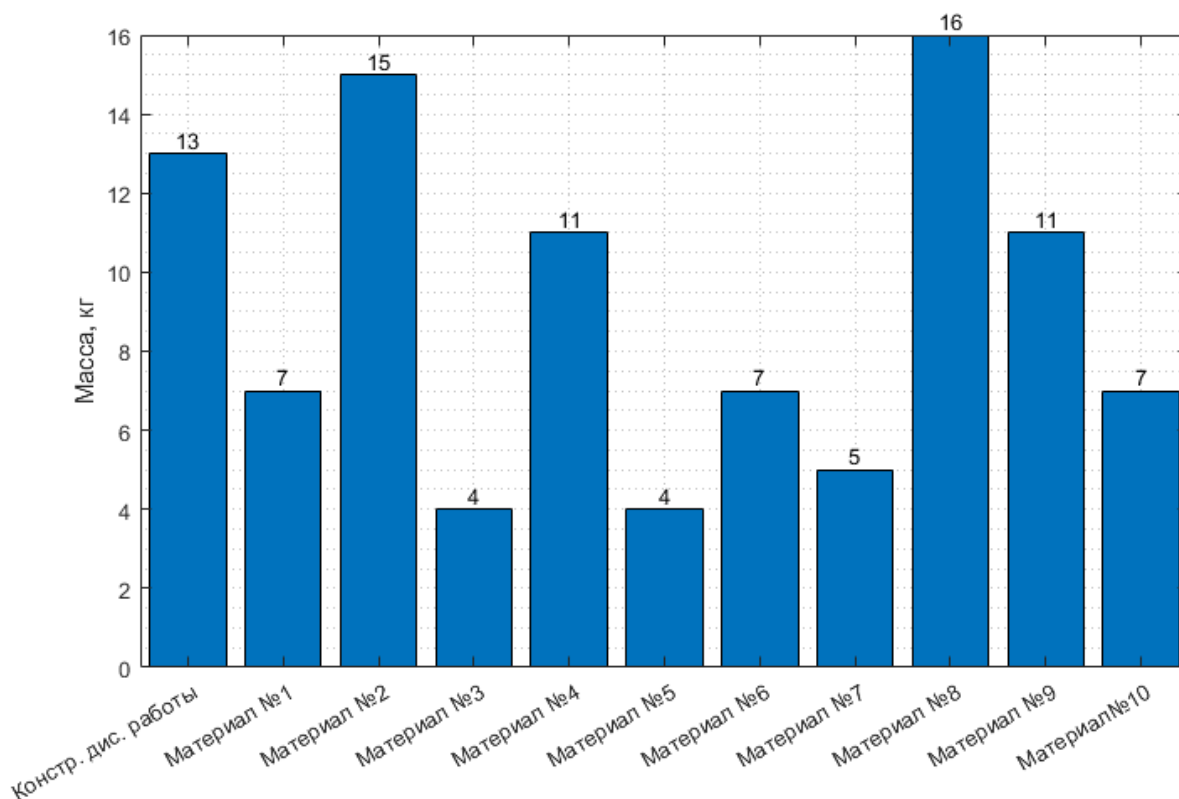


Рисунок 3.2.5 – Массы конструкций при толщинах необходимых для получения показателей теплопроводности предлагаемой КТИ

Рисунок 3.2.5 показывает, что предлагаемая конструкция уступает по массе практически всем материалам кроме конструкций с материалами №2 (минеральная вата с большой плотностью) и №8 (пенополиуретан с большой плотностью).

3.3 Теплоизоляционные показатели БПЛА с применением КТИ, формируемой на основе принципов проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций

В данном разделе рассматривается влияние КТИ, спроектированной по установленным принципам проектного формирования эффективных теплоизоляционных конструкций на агрегаты БПЛА, работающие в температурных условиях Арктики. То есть, проводятся исследования

теплообмена агрегатов БПЛА при воздействии температуры внешней среды с учётом его полёта.

Исследования проводятся с несколькими категориями БПЛА, такими как:

- Мини-БПЛА площадь сечения, которых в среднем составляет $0,01 \text{ м}^2$;
- Лёгкие БПЛА площадь сечения, которых в среднем составляет $0,035 \text{ м}^2$;
- Средние БПЛА площадь сечения, которых в среднем $0,075 \text{ м}^2$;
- БПЛА с большой продолжительностью полёта площадь сечения, которых в среднем $0,2 \text{ м}^2$.

Поскольку БПЛА производят с различными геометриями, то в диссертационной работе агрегаты БПЛА рассматриваются в виде цилиндра. Исследования теплообмена рассматривается в сечениях агрегатов БЛА. Диаметры сечений агрегатов для категорий БПЛА будут иметь следующие значения:

- для мини БПЛА диаметр сечения составляет 100 мм;
- для лёгких БПЛА диаметр сечения составляет 200 мм;
- для средних БПЛА диаметр сечения составляет 300 мм;
- для БПЛА с большой продолжительностью полёта диаметр сечения составляет 500 мм.

Для начала рассмотрим агрегаты БПЛА, в которых размещена различная техника. Сечение данных агрегатов БПЛА для проведения исследования будет иметь вид, представленный на Рисунке 3.3.1.

Следует отметить, что в данном разделе проводятся исследования, при которых отношение площади воздушного пространства, занимаемое в агрегате очень мало по сравнению с площадью занимаемой аппаратуры. Таким образом, увеличение теплоизоляции агрегата сопровождается только теплоизоляционной конструкцией. Исследования по повышению теплоизоляционных свойств конструктивом БПЛА описано во 2-ой главе раздела 2.5.

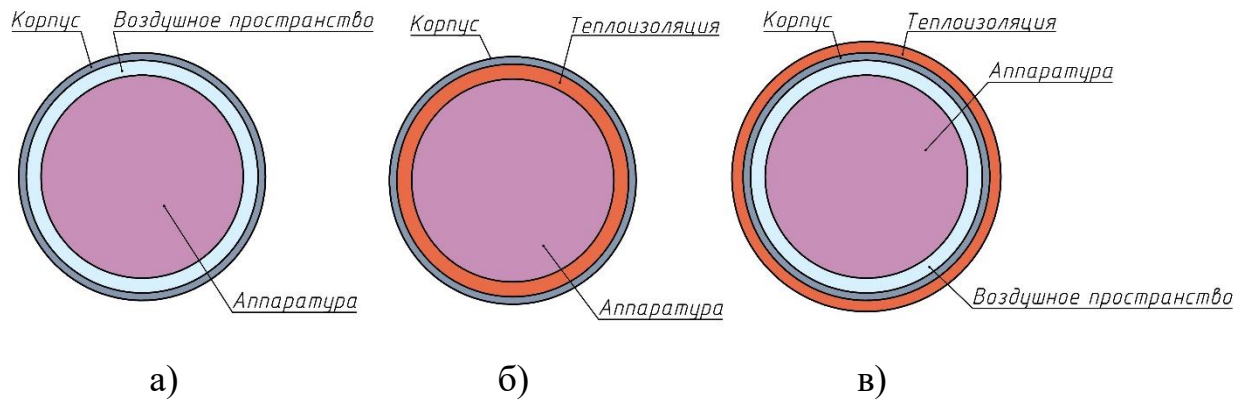


Рисунок 3.3.1 – Сечение агрегатов БПЛА с размещенной техникой, где: а) без теплоизоляции; б) с внутренней теплоизоляцией; в) с внешней теплоизоляцией

Эскиз с габаритными размерами для сечений БПЛА представлены на Рисунке 3.3.2, где значения габаритных размеров представлены в Таблице 3.3.1.

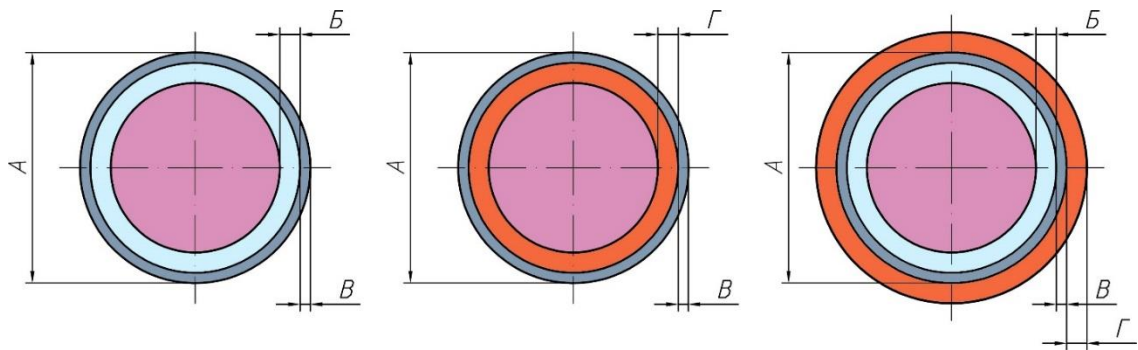


Рисунок 3.3.2 – Эскиз с габаритными размерами

Таблица 3.3.1 – Значения габаритных размеров сечений агрегатов БПЛА

Категории БПЛА	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм
Мини-БПЛА	100	2	3	20
Легкие БПЛА	200	4		
Средние БЛА	300	6		
БПЛА с большой продолжительностью полета	500	8		

Перейдём к исследованиям теплообмена рассматриваемых агрегатов БПЛА. Проводятся данные исследования при воздействии вынужденной конвекции α , значение которой равно $450 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ с температурой $T_в$ внешней среды минус 50°С . Значение начальной температуры конструкций T_0 задаётся плюс 25°С . Задача проводимых исследований – определение

времени, при котором температура агрегатов БПЛА опустится до температуры плюс 5°C при воздействии температуры внешней среды в условиях полёта БПЛА. Теплофизические характеристики элементов конструкции БПЛА представлены в Таблице 3.3.2.

Таблица 3.3.2 – Теплофизические характеристики элементов конструкции БПЛА

Элементы конструкции агрегата БПЛА	Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°C)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
Корпус	Стеклопластик	1800	962	0,32
Аппаратура	Алюминий-магниевый сплав	2640	922	122
Теплоизоляция	Конструкция №7 из раздела 3.1, таблицы 3.1.2			

Для исследования теплообмена рассматриваемых агрегатов БПЛА принято допущение, что характеристики теплопроводности материалов и газа являются постоянными в пределах заданных температурных условий.

Для построения математической постановки задач использовались уравнения (78) – (81) и начальные, граничные условия (82) - (84), (86).

На границах $R = r_3, r_4$ выполняется условие:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_g - T). \quad (99)$$

На границах раздела твердого материала и газа $r = r_1, r_2, r_3$ выполняется условия:

– для агрегата без и с внутренней теплоизоляцией:

$$\begin{cases} T_1(t, r, \varphi) = T_2(t, r, \varphi), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \end{cases} ; \quad (100)$$

$$\begin{cases} T_2(t, r, \varphi) = T_3(t, r, \varphi), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2} \end{cases} . \quad (101)$$

– для агрегата с внешней теплоизоляцией:

$$\begin{cases} T_1(t, r, \varphi) = T_2(t, r, \varphi), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_1} ; \end{cases} \quad (102)$$

$$\begin{cases} T_2(t, r, \varphi) = T_3(t, r, \varphi), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_2} . \end{cases} \quad (103)$$

$$\begin{cases} T_3(t, r, \varphi) = T_4(t, r, \varphi), \\ -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=r_3} . \end{cases} \quad (104)$$

Область решения представлена на Рисунке 3.3.3.

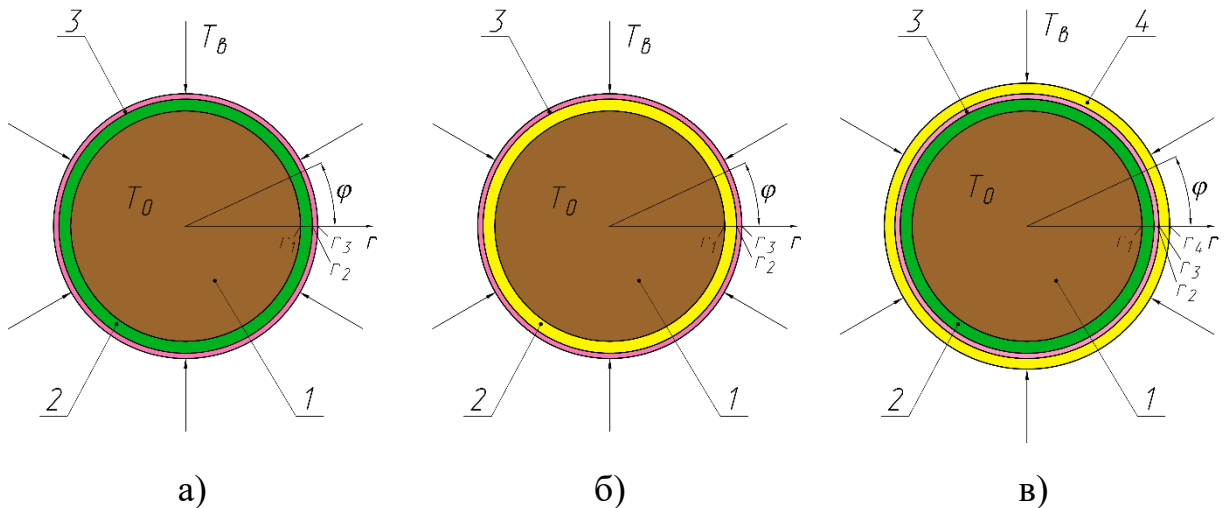


Рисунок 3.3.3 – Область решения задачи для сечения агрегата БПЛА: а) без теплоизоляции; б) с внутренней теплоизоляцией; в) с внешней теплоизоляцией

Краевая задача в соответствии с Рисунком 3.3.3 для уравнений (78) – (81) с учетом начальных и граничных условий (82) – (84), (86), (99) – (104) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнений (78) – (81) применялась локально-одномерная схема Самарского [86].

Результаты исследований теплообмена рассматриваемых агрегатов БПЛА представлены в Таблицах 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 и на Рисунках 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7.

Таблица 3.3.3 – Температура на границе r_1 относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 100 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	1	2	4	6	10
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	4	-10	-29	-38	-47
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	21,5	18	11	5	-6
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	22	17	13	5

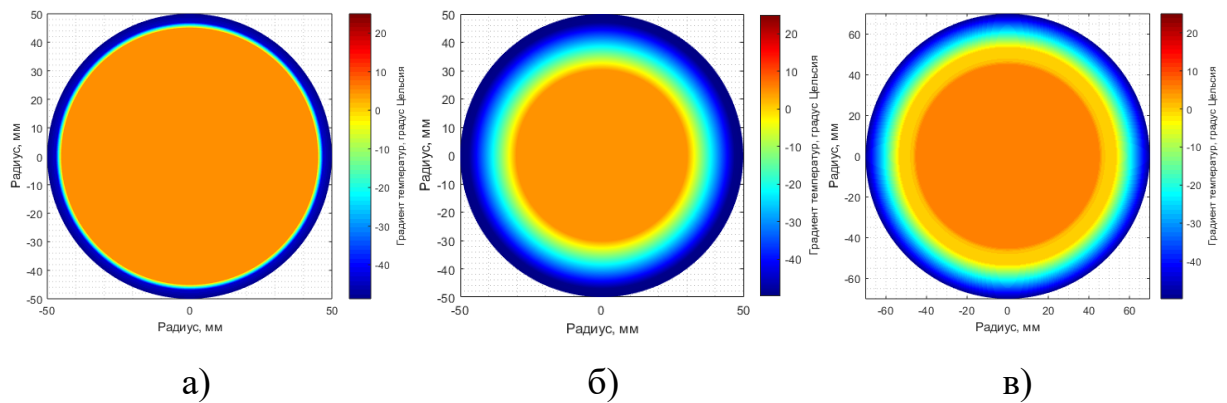
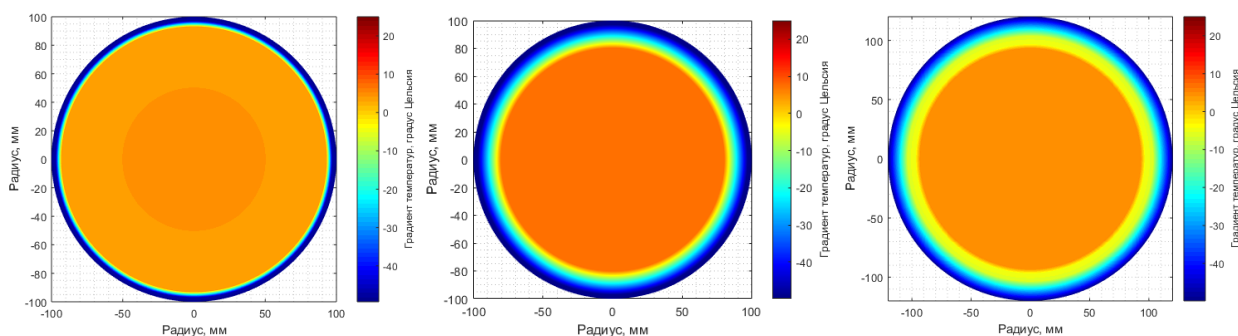


Рисунок 3.3.4 – Температура агрегата БПЛА диаметром 100 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 1 час без теплоизоляции; б) 6 часов с внутренней теплоизоляцией; в) 10 часов с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.4 – Температура на границе r_1 относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 200 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	2	4	6	12	21
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	13	4	-4	-22	-37
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	22	19	16	7	-3
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	23	21	13	5



а)

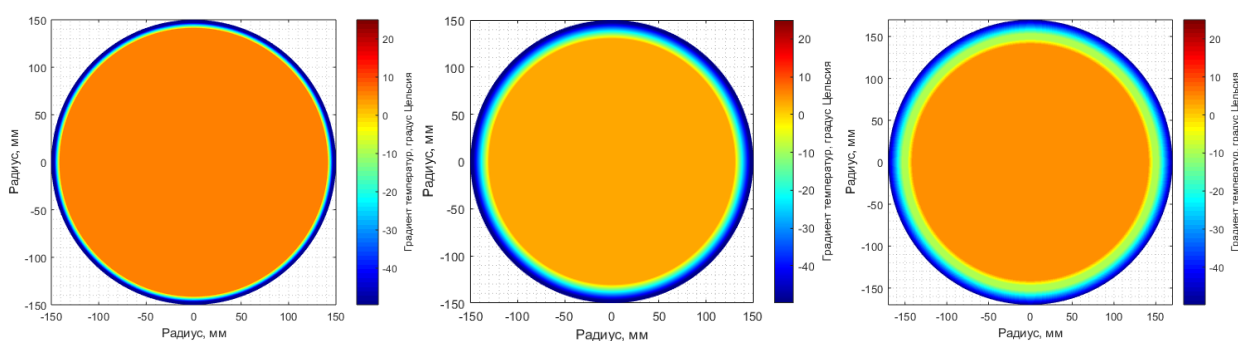
б)

в)

Рисунок 3.3.5 – Температура агрегата БПЛА диаметром 200 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 4 часа без теплоизоляции; б) 12 часов с внутренней теплоизоляцией; в) 21 час с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.5 – Температура на границе r_1 относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 300 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	2	4	8	12	24	34
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	20	15	5	-1	-19	-28
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	23	21	17	13	3	-4
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	23	20	18	10	5



а)

б)

в)

Рисунок 3.3.6 – Температура агрегата БПЛА диаметром 300 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 8 часов без теплоизоляции; б) 24 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 34 часа с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.6 – Температура на границе r_1 относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 500 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	2	4	6	12	24	36	48	64
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	23	21	19	13	5	-4	-10	-18
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	24	23	21	18	12	6	0	-5
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	25	24	23	21	17	13	9	5

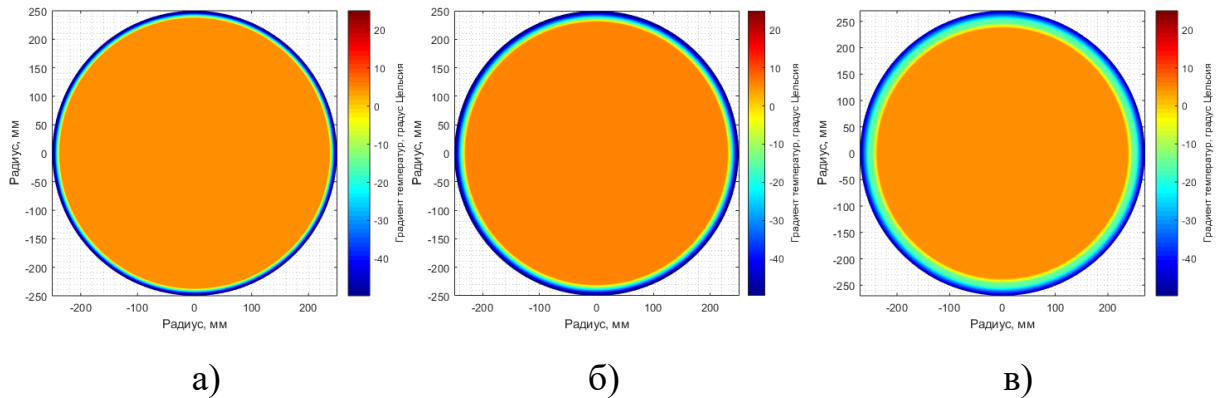


Рисунок 3.3.7 – Температура агрегата БПЛА диаметром 500 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 24 часа без теплоизоляции; б) 36 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 64 часа с внешней теплоизоляцией

Результаты теплообмена в агрегатах БПЛА с условным размещением аппаратуры во внутренней полости БПЛА показывают, что:

- для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 100 мм время остывания до плюс 5°С примерно составляет 10 часов, что в 10 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;
- для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 200 мм время остывания до плюс 5°С примерно составляет 24 часа, что в 8 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 300 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 48 часа, что в 6 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 500 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 64 часа, что в 2.5 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции.

Также результаты показывают, что с увеличением толщины воздушного пространства между корпусом и аппаратуры БПЛА отношение теплоизоляционных свойств агрегатов уменьшается. Данный процесс подробнее описан во второй главе в разделе 2.5.

Рассмотрим агрегаты с различными диаметрами, где их внутренняя полость составляет воздушное пространство. Сечение данных агрегатов БПЛА для проведения исследования будет иметь вид, представленный на Рисунке 3.3.8.

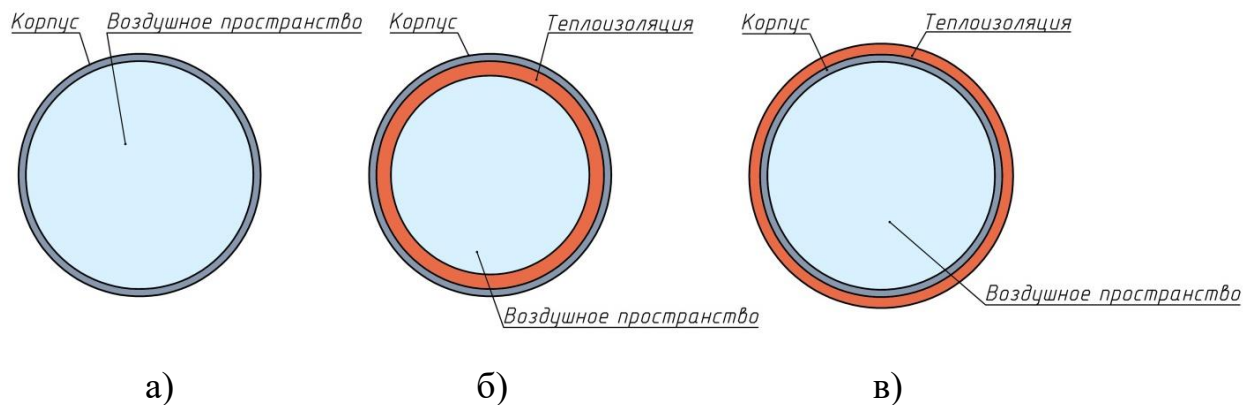


Рисунок 3.3.8 – Сечение агрегатов БПЛА с воздушным пространством, где, где: а) без теплоизоляции; б) с внутренней теплоизоляцией; в) с внешней теплоизоляцией

Эскиз с габаритными размерами для сечений БПЛА представлены на рисунке 3.3.9, где значения габаритных размеров представлены в таблице 3.3.7.

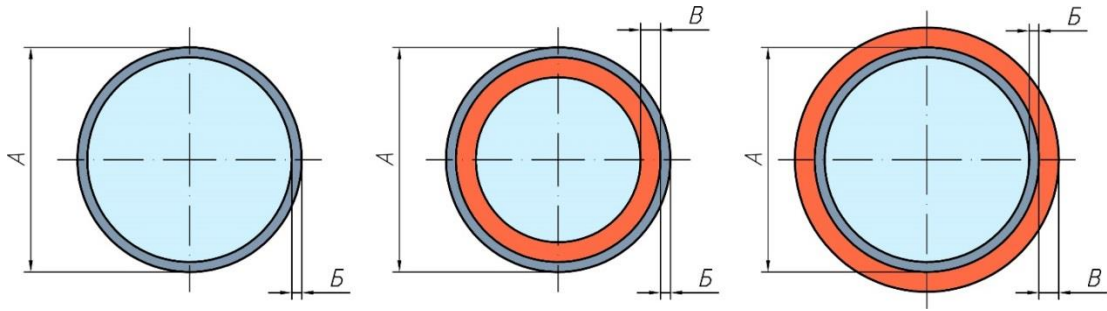


Рисунок 3.3.9 – Эскиз с габаритными размерами

Таблица 3.3.7 – Значения габаритных размеров сечений агрегатов БПЛА

Категории БПЛА	А, мм	Б, мм	В, мм
Мини-БПЛА	100	3	20
Легкие БПЛА	200		
Средние БПЛА	300		
БПЛА с большой продолжительностью полета	500		

Условия, исходные данные берутся из исследования теплообмена агрегатов с размещенной техникой.

Для построения математической постановки задач использовались уравнения (78) – (81) и начальные, граничные условия (82) - (84), (86) – (89), (99). Область решения представлена на Рисунке 3.3.10.

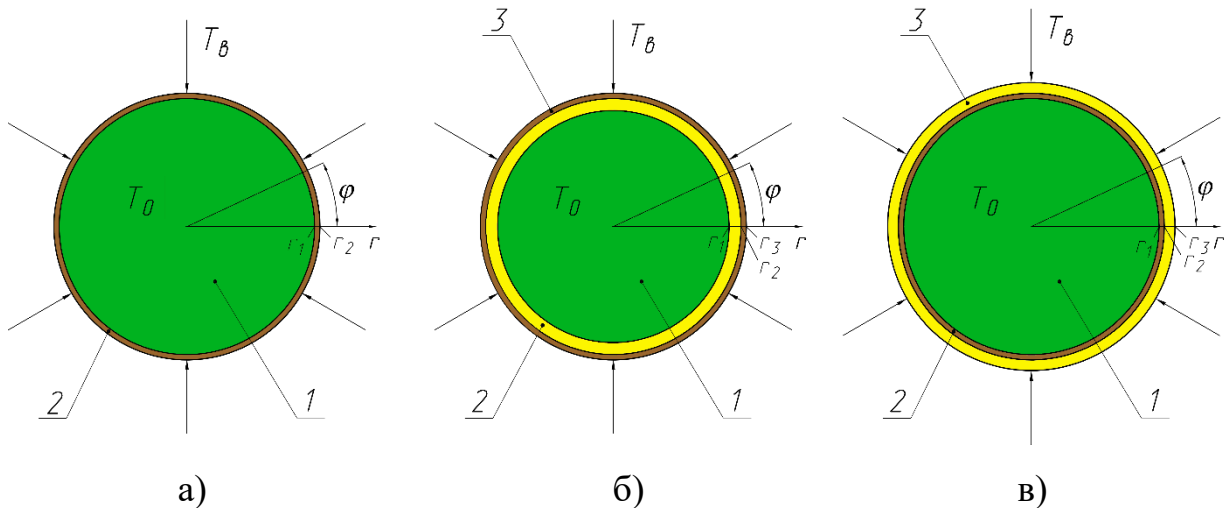


Рисунок 3.3.10 – Область решения задачи для сечения агрегата БПЛА:
а) без теплоизоляции; б) с внутренней теплоизоляцией; в) с внешней теплоизоляцией

Краевая задача в соответствии с Рисунком 3.3.10 для уравнений (78) – (81) с учетом начальных и граничных условий (82) - (84), (86) – (89), (99)

решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнений (78) – (81) применялась локально-одномерная схема Самарского [86].

Результаты исследований теплообмена рассматриваемых агрегатов БЛА представлены в Таблицах 3.3.8 – 3.3.11 и на Рисунках 3.3.11 – 3.3.14.

Таблица 3.3.8 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 100 мм

Время воздействия отрицательной температуры	10 мин.	30 мин.	1 час	2 часа	3 часа	4 часа
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-38	-45	-47	-50		
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	23	18	12	10	4	-1
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	18	15	12	8	3

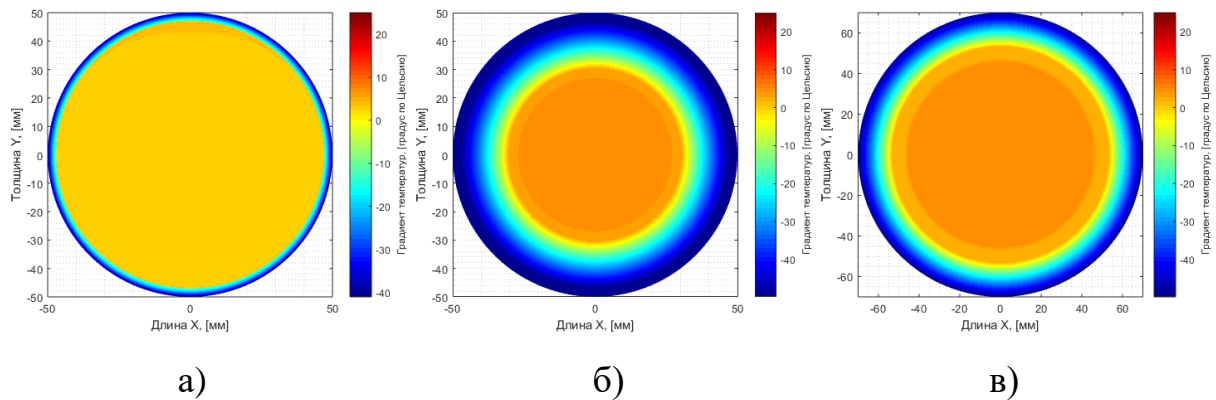


Рисунок 3.3.11 – Температура агрегата БПЛА диаметром 100 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 1 мин без теплоизоляции; б) 3 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 4 часа с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.9 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 200 мм

Время воздействия отрицательной температуры	10 мин.	30 мин.	1 час	2 часа	3 часа	4 часа
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-28	-40	-45	-48	-49	-50
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	23	21	18	11	6	2
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	18	16	10	9	4

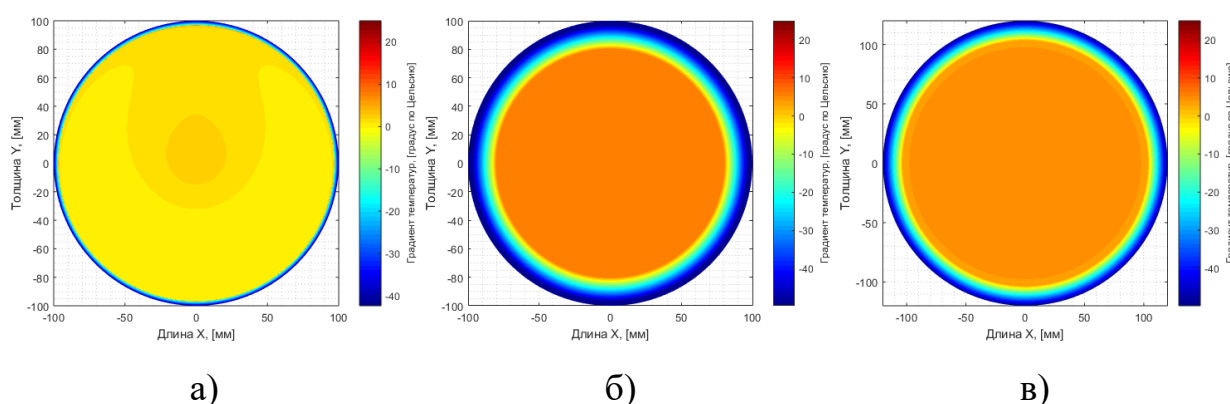


Рисунок 3.3.12 – Температура агрегата БПЛА диаметром 200 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 1,5 мин без теплоизоляции; б) 3 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 4 часа с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.10 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 300 мм

Время воздействия отрицательной температуры	10 мин	30 мин	1 час	2 часа	4 часа	4,5 часа
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-21	-31	-39	-45	-47	-49
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	24	21	18	12	3	1
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	24	21	18	13	5	3

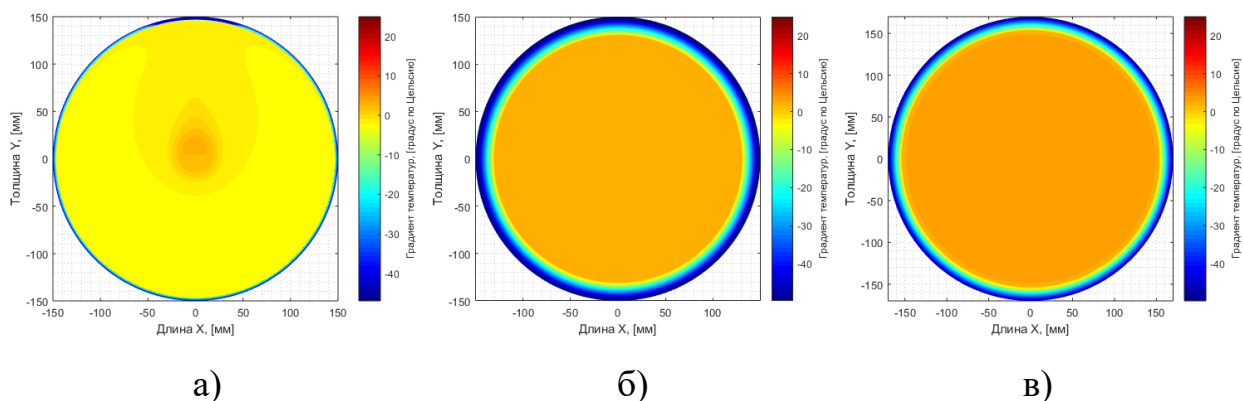


Рисунок 3.3.13 – Температура агрегата БПЛА диаметром 300 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 2 мин без теплоизоляции; б) 4 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 4,5 часа с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.11 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 500 мм

Время воздействия отрицательной температуры	10 мин.	30 мин.	1 час	2 часа	4 часа	5 часов
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-13	-25	-32	-39	-43	-49
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	24	22	19	14	4	0
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	25	22	19	14	6	4

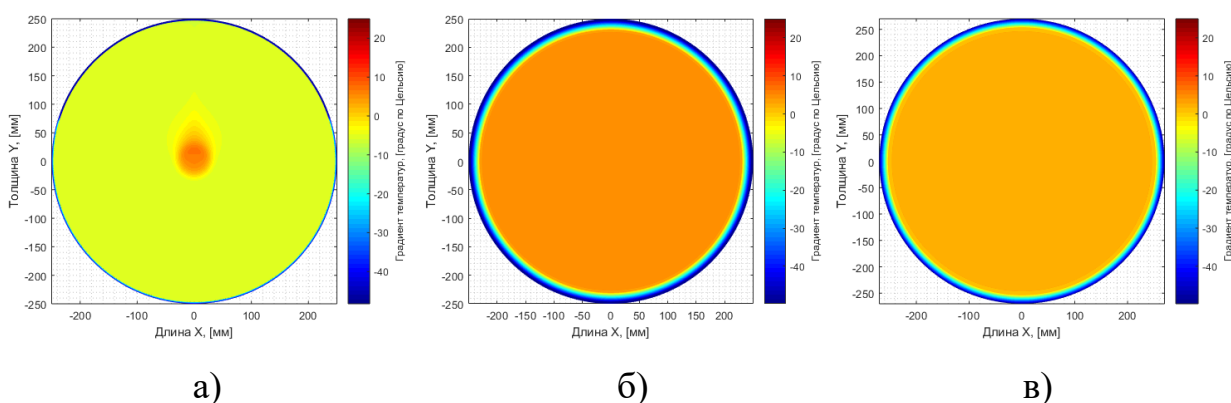


Рисунок 3.3.14 – Температура агрегата БПЛА диаметром 500 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 3 мин без теплоизоляции; б) 4 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 5 часов с внешней теплоизоляцией

Результаты исследования теплообмена в агрегатах с воздушным пространством, при различных диаметрах БПЛА показывают, что:

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 100 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 4 часа, что практически в 240 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 200 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 4 часа, что в 160 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 300 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 4,5 часа, что в 135 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 500 мм время остывания до плюс 5°C примерно составляет 5 часов, что в 100 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции.

Также результаты показывают, что относительно проведённых исследований теплообмена агрегатов, в которых учитывается аппаратура, агрегаты с воздушным пространством имеют теплоизоляционные свойства на порядок ниже. Данный процесс подробнее описан во второй главе в разделе 2.5.

Рассмотрим БПЛА с топливным резервуаром при различных диаметрах. Сечение данных агрегатов БПЛА для проведения исследования будет иметь вид, представленный на Рисунке 3.3.15.

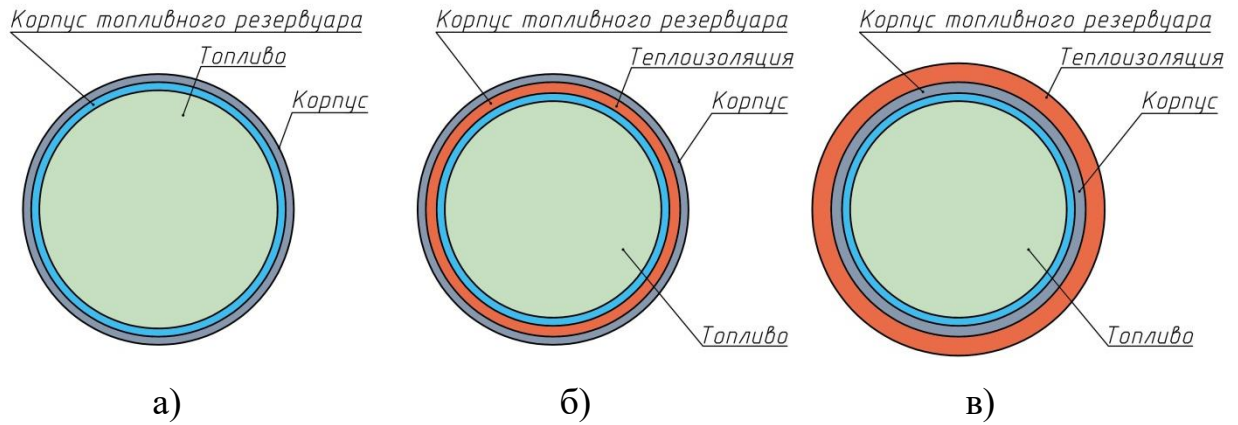


Рисунок 3.3.15 – Сечение агрегатов БПЛА с топливным резервуаром, где, где: а) без теплоизоляции; б) с внутренней теплоизоляцией; в) с внешней теплоизоляцией

Эскиз с габаритными размерами для сечений БПЛА представлены на Рисунке 3.3.16, где значения габаритных размеров представлены в Таблице 3.3.12.

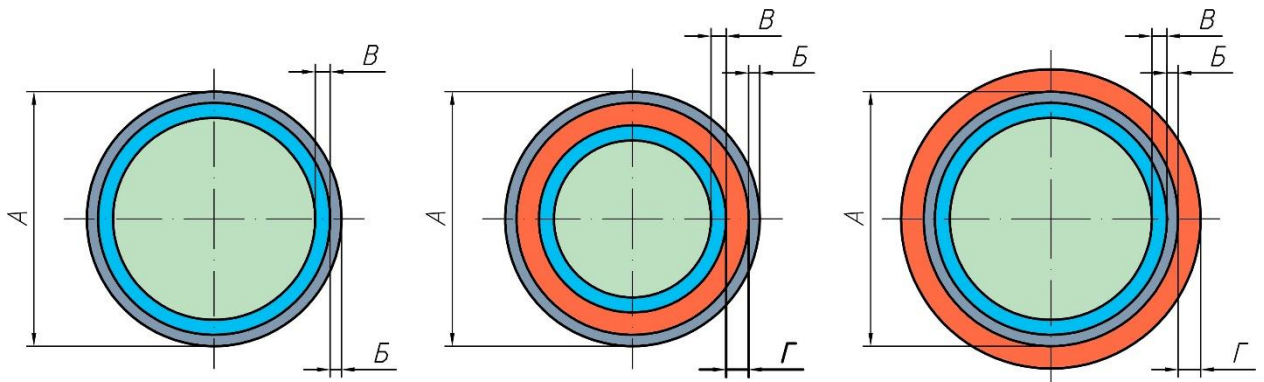


Рисунок 3.3.16 – Эскиз с габаритными размерами

Таблица 3.3.12 – Значения габаритных размеров сечений агрегатов БПЛА

Категории БПЛА	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм
Мини-БПЛА	100	3	5	20
Легкие БПЛА	200			
Средние БПЛА	300			
БПЛА с большой продолжительностью полета	500			

Условия, исходные данные берутся из исследования теплообмена агрегатов с размещённой техникой. За теплофизические характеристики

топлива принимаются характеристики керосина, которые имеют значения [94]:

- коэффициент теплопроводности λ_1 равен 0,1 Вт/(м · °С);
- плотность ρ_1 равна 800 кг/м³;
- удельная теплоёмкость C_{p1} равна 2000 Дж/(кг · °С);
- кинематическая вязкость керосина ν равна $1,819 \cdot 10^{-6}$ м²/с;
- термический коэффициент объёмного расширения β равен $9 \cdot 10^{-4}$ °С⁻¹.

За теплофизические характеристики материала корпуса топливного резервуара принимаются характеристики нержавеющей стали, которые имеют значения:

- коэффициент теплопроводности λ_2 равен 14 Вт/(м · °С);
- плотность ρ_2 равна 7800 кг/м³;
- удельная теплоёмкость C_{p2} равна 500 Дж/(кг · °С).

Для построения математической постановки задач использовались уравнения (78) – (81) и начальные, граничные условия (82) – (84), (86), (99), (100) – (104). Область решения представлена на Рисунке 3.3.3.

Краевая задача в соответствии с Рисунком 3.3.3 для уравнений (78) – (81) с учетом начальных и граничных условий (82) – (84), (86), (99) – (104) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнений (78) – (81) применялась локально-одномерная схема Самарского [86].

Результаты исследований теплообмена рассматриваемых агрегатов БЛА представлены в Таблицах 3.3.13 – 3.3.16 и на Рисунках 3.3.17 – 3.3.20.

Таблица 3.3.13 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 100 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	1	2	4	7	10
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-22	-28	-33	-37	-40
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	22	19	12	5	-1
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	22	20	16	11	5

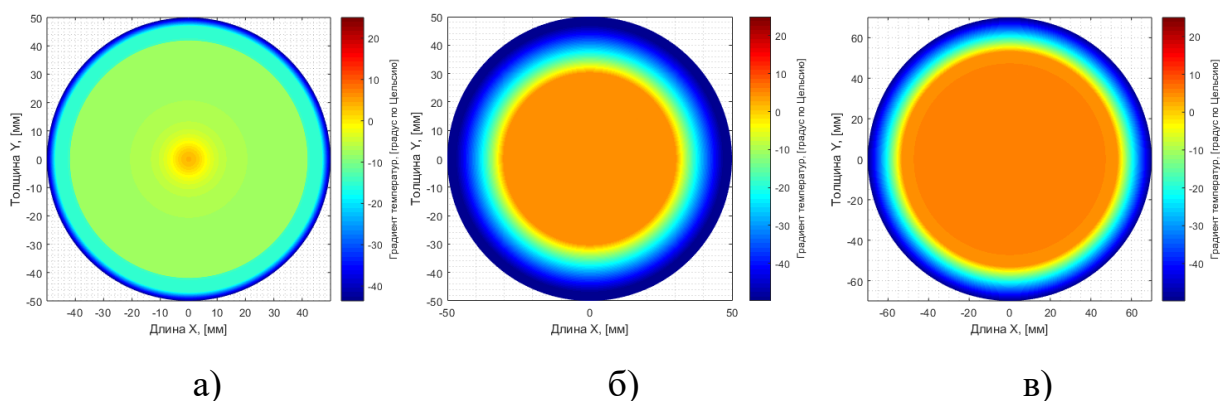


Рисунок 3.3.17 – Температура агрегата БПЛА диаметром 100 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 15 мин без теплоизоляции; б) 7 часов с внутренней теплоизоляцией; в) 10 часов с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.14 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 200 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	1	2	4	8	16
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	-15	-25	-28	-32	-35
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	24	21	18	13	5
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	23,5	21	17	12	3

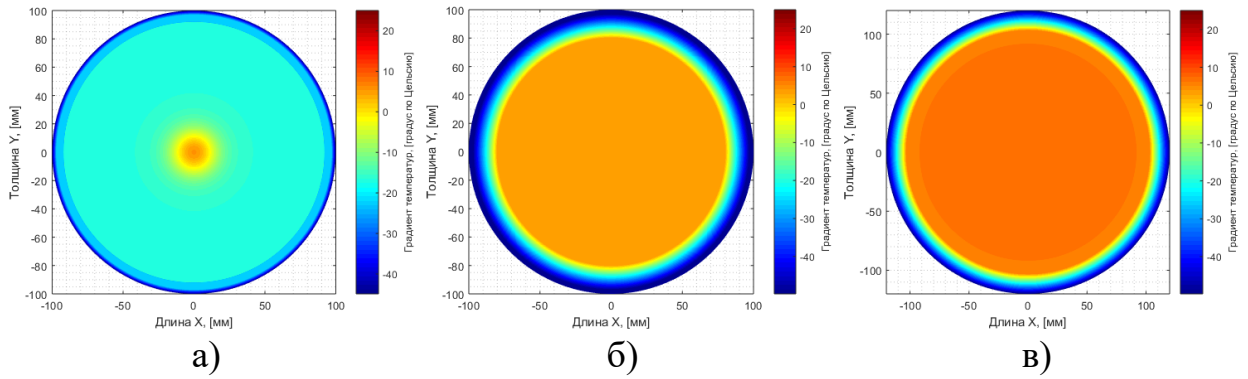


Рисунок 3.3.18 – Температура агрегата БПЛА диаметром 200 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 40 мин без теплоизоляции; б) 16 часов с внутренней теплоизоляцией; в) 16 часов с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.15 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 300 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	1	2	4	8	20	22
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	18	-19	-27	-29	-33	-33
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	25	22	18	14	5	3
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	25	23	19	14	6	5

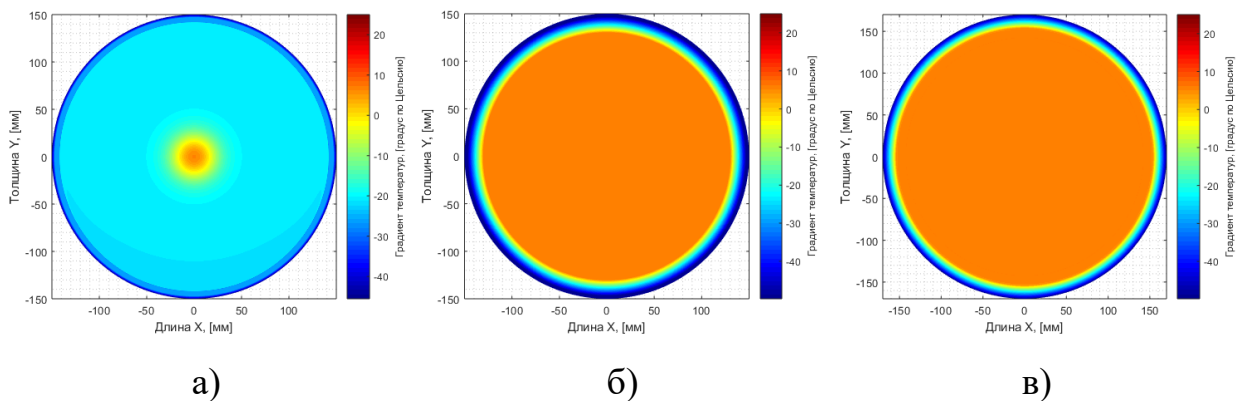


Рисунок 3.3.19 – Температура агрегата БПЛА диаметром 300 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 75 мин без теплоизоляции; б) 20 часов с внутренней теплоизоляцией; в) 22 часа с внешней теплоизоляцией

Таблица 3.3.16 – Максимальное положительное значение температуры агрегата относительно времени воздействия отрицательной температуры в условиях полета БПЛА диаметром 500 мм

Время воздействия отрицательной температуры, ч	1	2	4	8	16	24	32
Температура на границе r_1 агрегата без теплоизоляции, °С	25	21	-21	-28	-30	-31	-32
Температура на границе r_1 агрегата с внутренней теплоизоляцией, °С	25	25	20	15	9	5	2
Температура на границе r_1 агрегата с внешней теплоизоляцией, °С	25	25	21	16	12	6	5

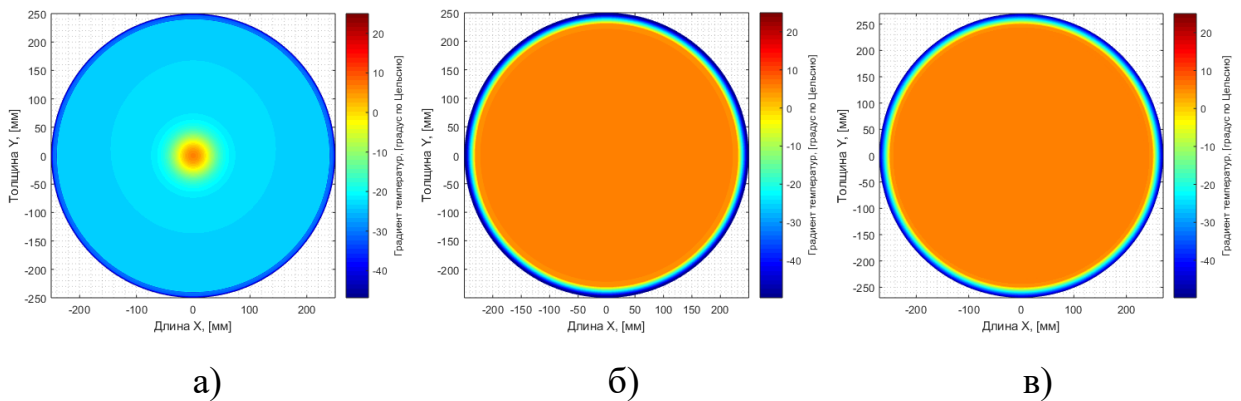


Рисунок 3.3.20 – Температура агрегата БПЛА диаметром 500 мм при временном воздействии отрицательной температуры, где: а) 2,5 часа без теплоизоляции; б) 24 часа с внутренней теплоизоляцией; в) 32 часа с внешней теплоизоляцией

Результаты исследования теплообмена в агрегатах с воздушным пространством, при различных диаметрах БПЛА показывают, что:

- для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 100 мм время остывания до 5°С примерно составляет 10 часа, что в 40 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;
- для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 200 мм время остывания до 5°С примерно составляет 16 часа, что в 23 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 300 мм время остывания до 5°C примерно составляет 20 часа, что в 16 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции;

– для агрегата БПЛА с теплоизоляцией диаметром 500 мм время остывания до 5°C примерно составляет 32 часов, что в 12 раз больше, чем у агрегата без теплоизоляции.

Также результаты показывают, что относительно проведённых исследований теплообмена агрегатов, в которых учитывается аппаратура, агрегаты с воздушным пространством имеют теплоизоляционные свойства на порядок ниже, но выше относительно агрегата с воздушным пространством.

Заключение по главе 3

Данная глава посвящена разработке теплоизоляционной конструкции для БПЛА, функционирующего в условиях экстремально низких температур, для которой решались следующие задачи:

1) Проектно-конструкторское формирование КТИ, которая удовлетворяет эксплуатационным, техническим и технологическим параметрам для введения КТИ в состав БПЛА в качестве средства теплоизоляции.

2) Проведение сравнительного анализа теплоизоляционных конструкций, входящих в состав БПЛА. Анализ показал, что, несмотря на относительно низкое преимущество по массе, которая обладает предлагаемая КТИ, в совокупности с геометрическими экономическими параметрами и физическими свойствами предлагаемая КТИ имеет значительное преимущество относительно других рассмотренных материалов, используемых в КТИ, как теплоизоляция в БПЛА.

3) Анализ влияния предлагаемой КТИ на теплоизоляционные свойства БПЛА в эксплуатационном режиме. Проведённые исследования теплообмена различных агрегатов БПЛА показывают, что введение предлагаемой КТИ в

состав БПЛА существенно влияет на продолжительность эффективной работы БПЛА в условиях полёта в арктических зонах. Наиболее подверженные к быстрому охлаждению агрегаты являются агрегаты, имеющие значительную часть воздушного пространства. Такие агрегаты могут быть, как отсеки для полезного груза и т.д. Максимальное время эффективной работы таких агрегатов, с учётом теплоизоляции, в условиях полёта БПЛА при высоких отрицательных температурах, достигает от 4 до 5 часов.

Остальные рассмотренные агрегаты, где большую часть пространства занимает различная аппаратура, и агрегаты с топливным резервуаром имеют высокие показатели теплоизоляции. А именно: максимальное время эффективной работы таких агрегатов, с учётом теплоизоляции, в условиях полёта БПЛА при высоких отрицательных температурах достигает от 10 до 64 часов.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ УСТАНОВЛЕННЫХ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1 Экспериментальное исследование теплообмена экспериментальных образцов

Данная глава посвящена верификации установленных принципов для формирования эффективных теплоизоляционных конструкций путем проведения климатических испытаний над экспериментальными образцами конструкции.

Для проведения экспериментальных исследований рассмотрим конструкцию, представленную на Рисунке 4.1.1.

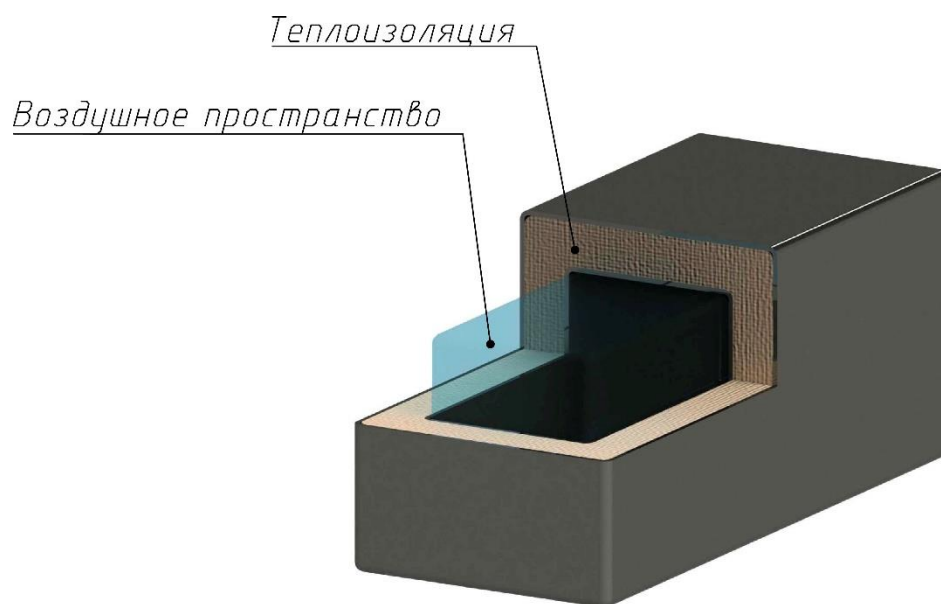


Рисунок 4.1.1 – Конструкция экспериментального образца

Модель конструкции имеет геометрию прямоугольного параллелепипеда, размеры которого представлены на Рисунке 4.1.2, и является полой. Стенки данной конструкции исполнены в виде

многослойного распределения различных материалов (теплоизоляционная обшивка) и имеют толщину 20 мм.

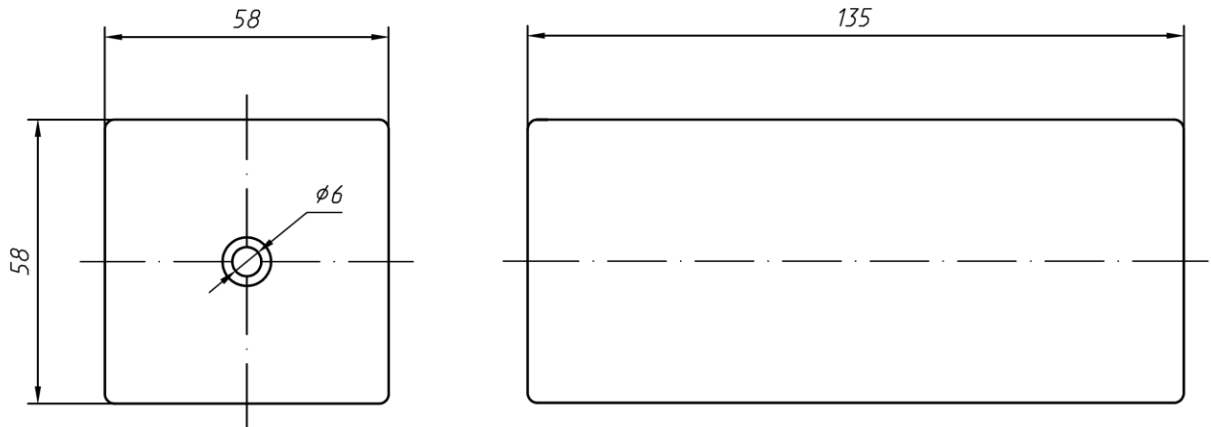


Рисунок 4.1.2 – Габаритные размеры конструкции экспериментальных образцов

Рассмотрим конструкции с двумя вариантами исполнения теплоизоляционных обшивок в конструкции, которые представлены на Рисунке 4.1.3.

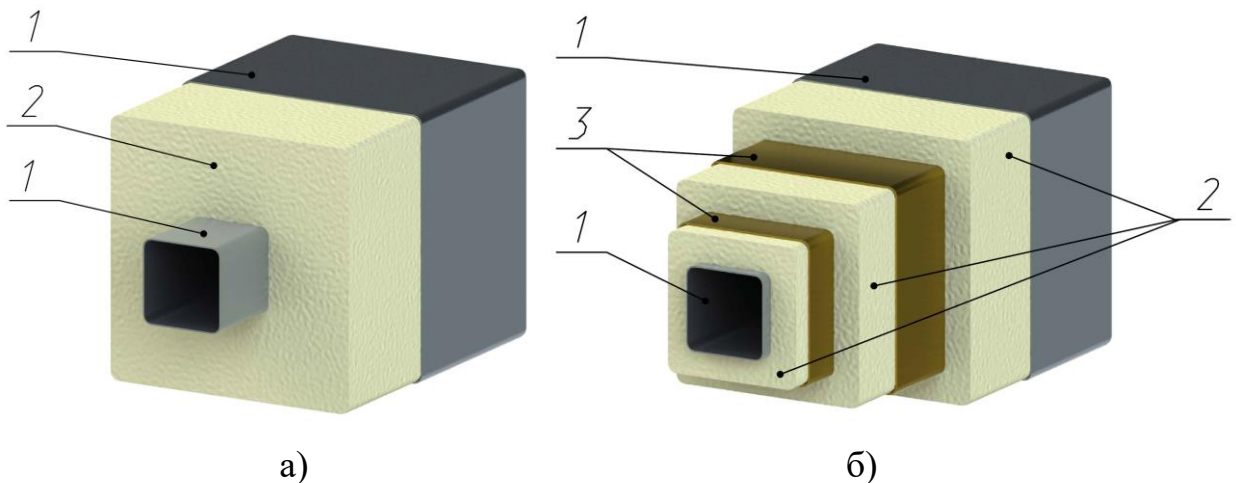


Рисунок 4.1.3 – Теплоизоляционная обшивка, где: а) трехслойное распределение материалов в обшивке; б) семислойное распределение материалов в обшивке

Данные обшивки имеют слои материалов: 1 – оцинкованная сталь, толщина которого составляет 0.35 мм; 2 – минеральная вата малой плотности, толщина которого составляет 19 мм для образца с и по 6 мм в образце с семислойным распределением материалов; семислойная обшивка

вдобавок имеет слой материала 3 – латунь, толщина которого составляет 0.5 мм. Значения теплофизических характеристик слоев материала представлены в Таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Теплофизические характеристики слоев материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м ²	Удельная теплоёмкость,
Оцинкованная сталь	60	7800	500
Минеральная вата	0,038	35	840
Латунь	250	8500	380

Рассмотрим экспериментальные образцы конструкций, которые представлены на Рисунках 4.1.4 и 4.1.5.



Рисунок 4.1.4 – Экспериментальные образцы

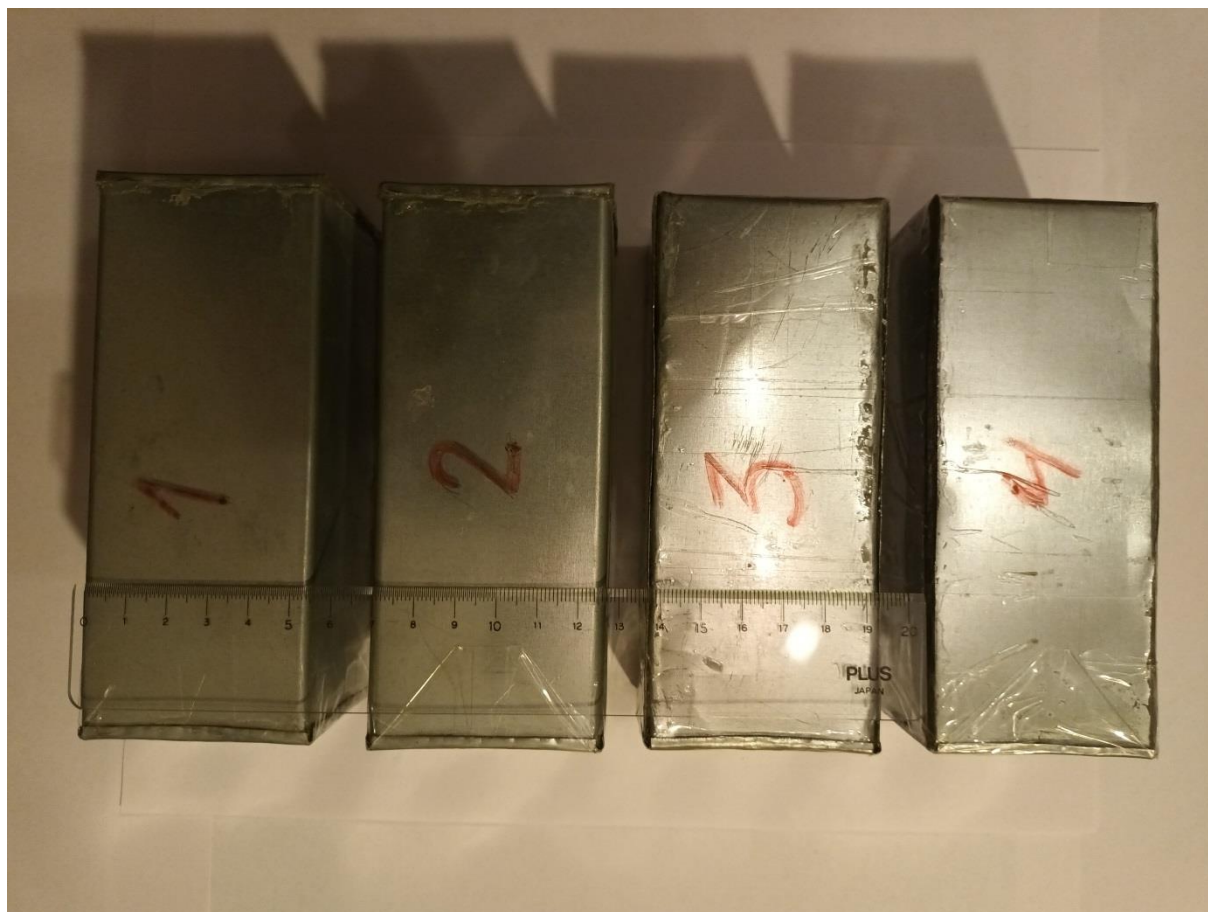


Рисунок 4.1.5 – Экспериментальные образцы

Рисунки 4.1.4 и 4.1.5 показывают, что каждый образец имеет свою нумерацию, а именно:

- образцы №1, №3 – образцы с трехслойной обшивкой;
- образцы №2, №4 – образцы с семислойной обшивкой.

Для проведения исследования теплопроводности данных образцов использовалась следующая техническая аппаратура:

- 1) Климатотермокамера ZTH100U зав.№1010070;
- 2) Термопреобразователи ТС-1288-2 100П/А;
- 3) Температурный регистратор РМТ 59М.

Образцы №1-№4 помещались в климатотермокамеру с установленными термопреобразователями на образцы (Рисунок 4.1.6), где схема установки термопреобразователей представлена на Рисунке 4.1.7. Климатотермокамере задавались следующие режимы:

1) Температура окружающей среды с начальной температурой плюс 30°C до заданной минус 50°C в течение 1 час 30 мин (см. рисунок 4.1.8).

2) Температура окружающей среды с начальной температурой плюс 25°C до заданной плюс 80°C в течение 1 час 30 мин (см. рисунок 4.1.9).

Подробная информация о проведении испытаний образцов конструкции представлено в приложении 1.



Рисунок 4.1.6 – Экспериментальные образцы №1-№4 помещенные в климотермокамере

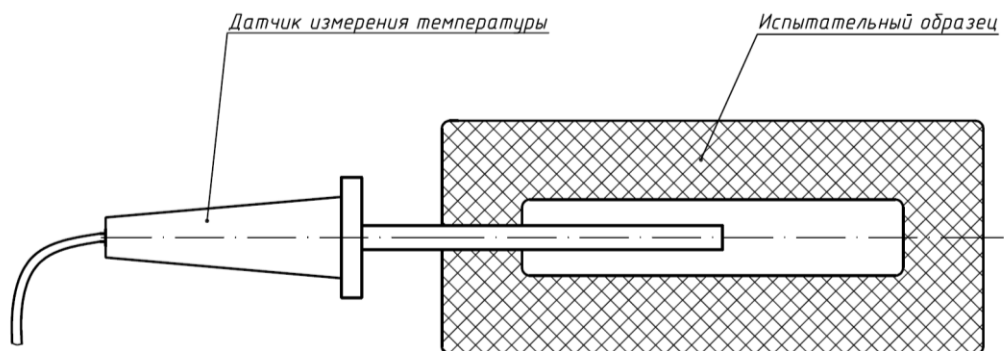


Рисунок 4.1.7 – Схема установки датчиков в экспериментальные образцы конструкции



Рисунок 4.1.8 – Образцы №1-№4 во время проведения испытаний при задаваемом режиме воздействия окружающей среды минус 50°С



Рисунок 4.1.9 – Образцы №1-№4 во время проведения испытаний при задаваемом режиме воздействия окружающей среды плюс 80°С

Вследствие проведённых исследований над образцами конструкции №1-№4 температурный регистратор вывел следующие значения температур в

зависимости от времени в виде графиков, представленные на Рисунках 4.1.10 и 4.1.11.

Результаты исследований теплопроводности экспериментальных образцов показывают, что:

1) В случае проведения испытаний над образцами №1-№4 при задаваемом режиме воздействия окружающей среды минус 50°C максимальное расхождение температуры между образцами №1, 3 (перо 1, 3) (трёхслойная обшивка) с образцами №2, №4 (перо 2, 4) (семислойная обшивка) составляет 15°C на интервале времени воздействия отрицательной температуры 45 мин. Максимальное расхождение температуры между образцами №1 и №3 составляет 3°C, а у образцов №2 и №4 составляет 2°C.

2) В случае проведения испытаний над образцами №1-№4 при задаваемом режиме воздействия окружающей среды плюс 80°C максимальное расхождение температуры между образцами №1, №3 (перо 1, 3) (трёхслойная обшивка) с образцами №2, №4 (перо 2, 4) (семислойная обшивка) составляет 12°C на интервале времени воздействия положительной температуры 30 мин. Максимальное расхождение температуры между образцами №1 и №3 составляет 3°C, а у образцов №2 и №4 составляет 2°C.

Значения температуры пера 5 являются значениями температуры воздуха в камере.

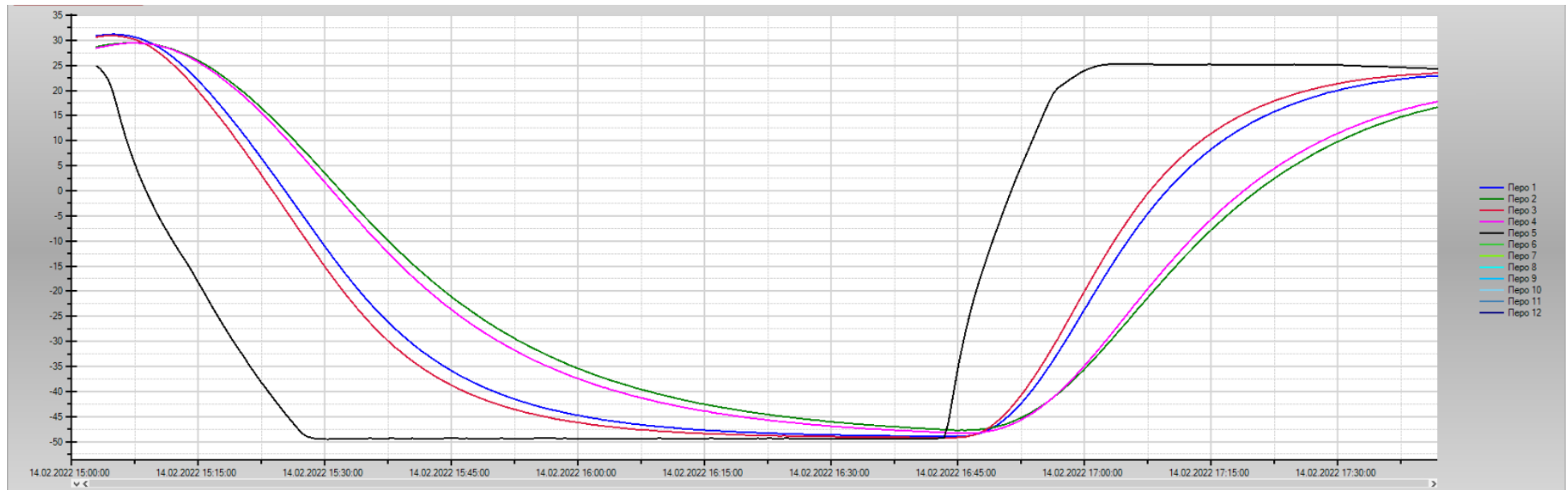


Рисунок 4.1.10 – График температур образцов №1-4 в зависимости от времени воздействия температуры воздушной среды минус 50°C

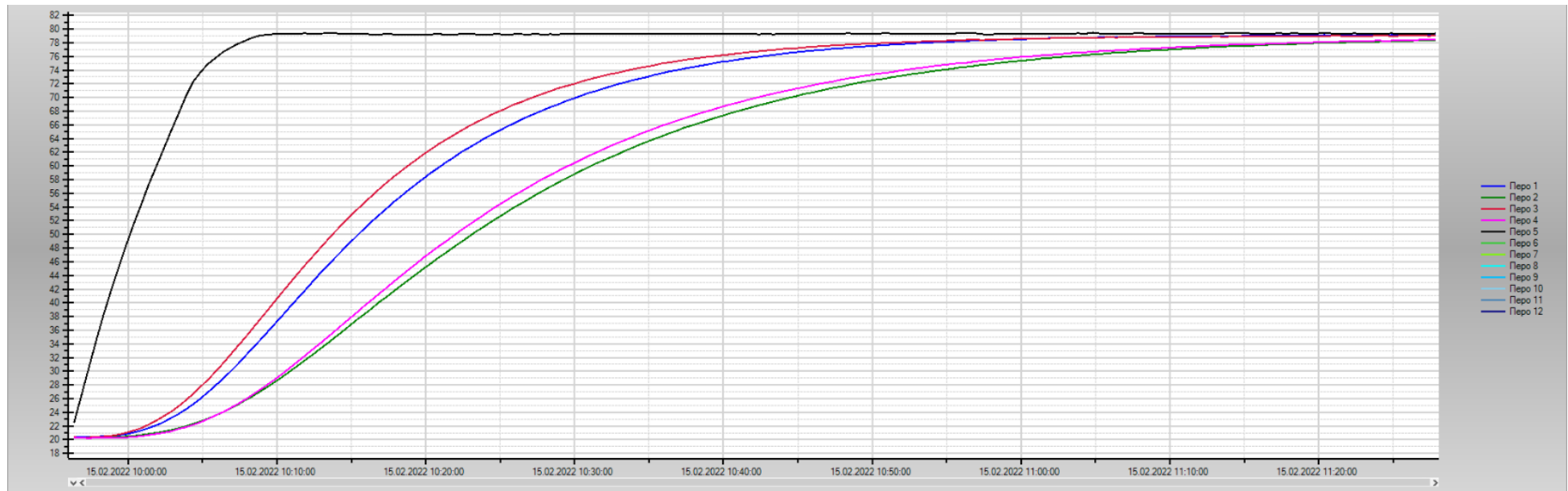


Рисунок 4.1.11 – График температур образцов №1-4 в зависимости от времени воздействия температуры воздушной среды плюс 80°C.

4.2 Теоретическое исследование теплообмена моделей экспериментальных конструкций

Для оценки верификации проведённых в диссертационной работе теоретических исследований конструкций и материалов, необходимо провести теоретические исследования теплообмена моделей экспериментальных конструкций. Проведём аналогичные исследования теплопроводности конструкций с размерами и вариантами исполнений данных конструкций, представленные на Рисунках 4.1.2 и 4.1.3, где теплофизические характеристики материалов, которые входят в конструкции, представлены в Таблице 4.1.1. В данных исследованиях рассматриваются сечения моделей экспериментальных конструкций.

Исходные данные для теоретических исследований определяются из значений проведённых экспериментальных исследований, по которым определяются начальная температура моделей конструкций. А именно:

– для модели с трёхслойной обшивкой начальная температура ($t = 0$) при воздействии минус 50°C имеет значения минус 5°C (образец №1) и минус 10°C (образец №3);

– для модели с трёхслойной обшивкой начальная температура при воздействии плюс 80°C имеет значения плюс 34°C (образец №1) и плюс 37°C (образец №3);

– для модели с семислойной обшивкой начальная температура при воздействии минус 50°C имеет значения плюс 7°C (образец №2) и плюс 6°C (образец №4);

– для модели с трёхслойной обшивкой начальная температура при воздействии плюс 80°C имеет значения плюс 27°C (образцы №2, 4).

Математическая постановка задачи исследования теплообмена модели конструкции с трёхслойной обшивкой имеет вид, указанный далее.

1. Уравнения теплообмена для рассматриваемой модели:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_4}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_5}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_6}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_6}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_7}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_7}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_7}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, 0 < x < x_1; \\
\frac{\partial T_8}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_8}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_8}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_9}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_9}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_9}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{10}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{10}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{10}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{11}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{11}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{12}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{12}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{12}}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{13}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{13}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{13}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{14}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{14}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{14}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_1 < x < x_2; \\
\frac{\partial T_{15}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{15}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{15}}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_2 < x < x_3; \\
\frac{\partial T_{16}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{16}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{16}}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_2 < x < x_3;
\end{array} \right. \quad (105)$$

Продолжение (105)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial T_{17}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{17}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{17}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_2 < x < x_3; \\
 \frac{\partial T_{18}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{18}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{18}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_2 < x < x_3; \\
 \frac{\partial T_{19}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{19}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_2 < x < x_3; \\
 \frac{\partial T_{20}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{20}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{20}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_2 < x < x_3; \\
 \frac{\partial T_{21}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{21}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_2 < x < x_3; \\
 \frac{\partial T_{22}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{22}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{22}}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{23}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{23}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{23}}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{25}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{25}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{25}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{26}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{26}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{26}}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{27}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{27}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{27}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{28}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{28}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{28}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_3 < x < x_4; \\
 \frac{\partial T_{29}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{29}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{29}}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_4 < x < x_5; \\
 \frac{\partial T_{30}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{30}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{30}}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_4 < x < x_5; \\
 \frac{\partial T_{31}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{31}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{31}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_4 < x < x_5; \\
 \frac{\partial T_{32}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{32}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{32}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_4 < x < x_5;
 \end{array} \right.$$

Продолжение (105)

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial T_{33}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{33}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{33}}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_4 < x < x_5; \\
\frac{\partial T_{34}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{34}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{34}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_4 < x < x_5; \\
\frac{\partial T_{35}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{35}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{35}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_4 < x < x_5; \\
\frac{\partial T_{36}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{36}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{36}}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_5 < x < x_6;; \\
\frac{\partial T_{37}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{37}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{37}}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{38}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{38}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{38}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{39}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{39}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{39}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{40}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{40}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{40}}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{41}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{41}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{41}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{42}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{42}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{42}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_5 < x < x_6; \\
\frac{\partial T_{43}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{43}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{43}}{\partial y^2} \right), 0 < y < y_1, x_6 < x < x_7; \\
\frac{\partial T_{44}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{44}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{44}}{\partial y^2} \right), y_1 < y < y_2, x_6 < x < x_7; \\
\frac{\partial T_{45}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{45}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{45}}{\partial y^2} \right), y_2 < y < y_3, x_6 < x < x_7; \\
\frac{\partial T_{46}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{46}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{46}}{\partial y^2} \right), y_3 < y < y_4, x_6 < x < x_7; \\
\frac{\partial T_{47}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{47}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{47}}{\partial y^2} \right), y_4 < y < y_5, x_6 < x < x_7;
\end{array} \right.$$

Продолжение (105)

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{48}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{48}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{48}}{\partial y^2} \right), y_5 < y < y_6, x_6 < x < x_7; \\ \frac{\partial T_{49}}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{49}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{49}}{\partial y^2} \right), y_6 < y < y_7, x_6 < x < x_7 \end{cases}$$

где n – нумерация коэффициента температуропроводности материалов в модели конструкции в соответствии с Рисунком 4.2.1 и Таблицей 4.1.1; 1, 2...49 – нумерация слоев материала;

– уравнения теплообмена в газах на участках от x_3 до x_4 и от y_3 до y_4 :

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} \rho \beta g \frac{\partial T_{24}}{\partial x}, \quad (106)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -2\omega, \quad (107)$$

$$\left(\frac{\partial T_{24}}{\partial t} + u \frac{\partial T_{24}}{\partial x} + v \frac{\partial T_{24}}{\partial y} \right) = a_n \left(\frac{\partial^2 T_{24}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{24}}{\partial y^2} \right). \quad (108)$$

2. Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_7, 0 < y < y_7; \quad (109)$$

$$t = 0: \psi = 0, 0 < x < x_7, 0 < y < y_7; \quad (110)$$

$$t = 0: \omega = 0, 0 < x < x_7, 0 < y < y_7; \quad (111)$$

3. На границах $x = 0, x_7$ и $y = 0, y_7$ выполняется условие:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T); \quad (112)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T_e - T). \quad (113)$$

4. На границах $y = y_3, y_4$ и $x = x_3, x_4$ выполняются условия:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0; \quad \omega = \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}, \quad \omega = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}. \quad (114)$$

5. На границах между слоями материалов выполняются условия:

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_1}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (115)$$

$$\begin{cases} T_2(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (116)$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (117)$$

$$\begin{cases} T_4(t, x, y) = T_5(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_4}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_5}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_4 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (118)$$

$$\begin{cases} T_5(t, x, y) = T_6(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_5}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_5 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (119)$$

$$\begin{cases} T_6(t, x, y) = T_7(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_6}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_7}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_6 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (120)$$

$$\begin{cases} T_8(t, x, y) = T_9(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_8}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_9}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (121)$$

$$\begin{cases} T_9(t, x, y) = T_{10}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_9}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (122)$$

$$\begin{cases} T_{10}(t, x, y) = T_{11}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{10}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \quad (123)$$

$$\begin{cases} T_{11}(t, x, y) = T_{12}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{11}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{12}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_4 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \end{cases} \quad (124)$$

$$\begin{cases} T_{12}(t, x, y) = T_{13}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{12}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{13}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_5 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \end{cases} \quad (125)$$

$$\begin{cases} T_{13}(t, x, y) = T_{14}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{13}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{14}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_7 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}; \end{cases} \quad (126)$$

$$\begin{cases} T_{15}(t, x, y) = T_{16}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{15}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{16}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_1 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (127)$$

$$\begin{cases} T_{16}(t, x, y) = T_{17}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{16}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{17}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_2 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (128)$$

$$\begin{cases} T_{17}(t, x, y) = T_{18}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{17}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{18}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_3 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (129)$$

$$\begin{cases} T_{18}(t, x, y) = T_{19}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{18}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{19}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_4 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (130)$$

$$\begin{cases} T_{19}(t, x, y) = T_{20}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{19}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{20}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_5 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (131)$$

$$\begin{cases} T_{20}(t, x, y) = T_{21}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{20}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{21}}{\partial y}, \quad \text{при} \begin{cases} y = y_6 \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases}; \end{cases} \quad (132)$$

$$\begin{cases} T_{22}(t, x, y) = T_{23}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{22}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{23}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (133)$$

$$\begin{cases} T_{23}(t, x, y) = T_{24}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{23}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{24}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (134)$$

$$\begin{cases} T_{24}(t, x, y) = T_{25}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{23}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{24}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (135)$$

$$\begin{cases} T_{24}(t, x, y) = T_{25}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{24}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{25}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_4 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (136)$$

$$\begin{cases} T_{26}(t, x, y) = T_{27}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{26}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{27}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_5 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (137)$$

$$\begin{cases} T_{27}(t, x, y) = T_{28}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{27}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{28}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_6 \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases}; \quad (138)$$

$$\begin{cases} T_{29}(t, x, y) = T_{30}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{29}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{30}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (139)$$

$$\begin{cases} T_{30}(t, x, y) = T_{31}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{30}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{31}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (140)$$

$$\begin{cases} T_{31}(t, x, y) = T_{32}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{33}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{34}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (141)$$

$$\begin{cases} T_{32}(t, x, y) = T_{33}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{32}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{33}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_4 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (142)$$

$$\begin{cases} T_{33}(t, x, y) = T_{34}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{33}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{34}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_5 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (143)$$

$$\begin{cases} T_{34}(t, x, y) = T_{35}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{34}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{35}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_6 \\ x_4 \leq x \leq x_5 \end{cases}; \quad (144)$$

$$\begin{cases} T_{36}(t, x, y) = T_{37}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{36}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{37}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (145)$$

$$\begin{cases} T_{37}(t, x, y) = T_{38}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{37}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{38}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (146)$$

$$\begin{cases} T_{38}(t, x, y) = T_{39}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{38}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{39}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (147)$$

$$\begin{cases} T_{39}(t, x, y) = T_{40}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{39}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{40}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_4 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (148)$$

$$\begin{cases} T_{40}(t, x, y) = T_{41}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{40}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{41}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_5 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (149)$$

$$\begin{cases} T_{41}(t, x, y) = T_{42}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{41}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{42}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_6 \\ x_5 \leq x \leq x_6 \end{cases}; \quad (150)$$

$$\begin{cases} T_{43}(t, x, y) = T_{44}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{43}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{44}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_1 \\ x_6 \leq x \leq x_7 \end{cases}; \quad (151)$$

$$\begin{cases} T_{44}(t, x, y) = T_{45}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{45}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{46}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_2 \\ x_6 \leq x \leq x_7 \end{cases}; \quad (152)$$

$$\begin{cases} T_{45}(t, x, y) = T_{46}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{45}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{46}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_3 \\ x_6 \leq x \leq x_7 \end{cases}; \quad (153)$$

$$\begin{cases} T_{46}(t, x, y) = T_{47}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{46}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{47}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_4 \\ x_6 \leq x \leq x_7 \end{cases}; \quad (154)$$

$$\begin{cases} T_{47}(t, x, y) = T_{48}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{47}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{48}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_5 \\ x_6 \leq x \leq x_7 \end{cases}; \quad (155)$$

$$\begin{cases} T_{48}(t, x, y) = T_{49}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_{48}}{\partial y} = -\lambda_n \frac{\partial T_{49}}{\partial y}, \end{cases} \text{ при } \begin{cases} y = y_6 \\ 0 \leq x \leq x_1 \end{cases}; \quad (156)$$

Аналогично граничным условиям (105) – (156) строятся граничные условия по координате x .

Область решения задачи представлена на Рисунке 4.2.1:

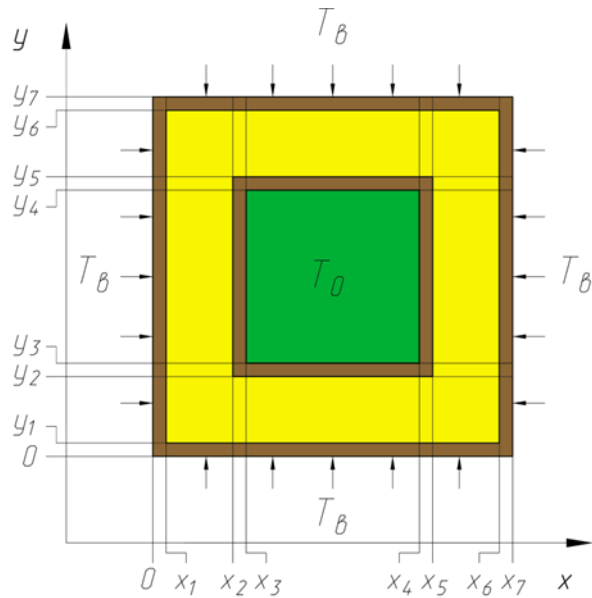


Рисунок 4.2.1 – Область решения задач модели экспериментальной конструкции с трехслойной обшивкой

Аналогично математической модели для конструкции с трехслойной обшивкой строится математическая модель для конструкции с семислойной обшивкой, согласно области решения задачи, представленной на Рисунке 4.2.2.

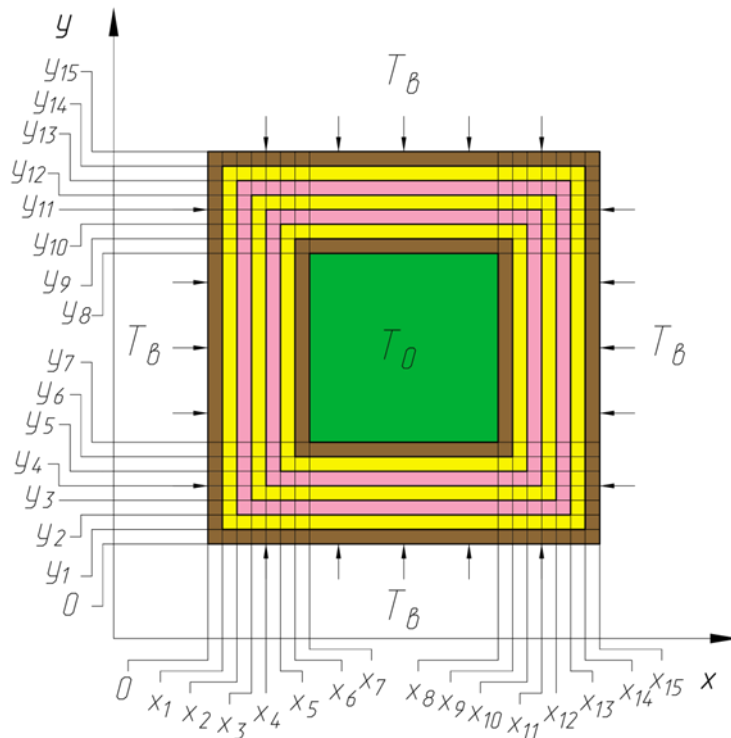


Рисунок 4.2.2 – Область решения задач модели экспериментальной конструкции с семислойной обшивкой

Краевая задача для уравнений (105) – (108) с учетом начальных и граничных условий (109) – (156) решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнения (105) – (108) применялась локально-одномерная схема Самарского [73].

Для сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований замер температур производится в точке A (Рисунок 4.2.3)

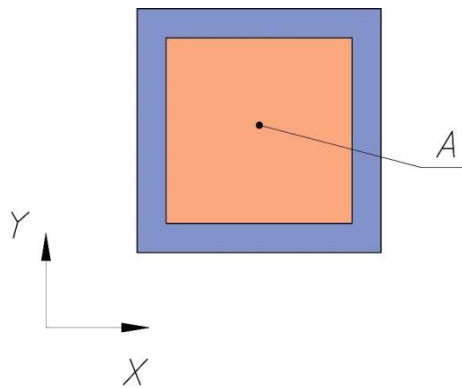


Рисунок 4.2.3 – Точка замера температуры

Результаты исследования теплопроводности моделей экспериментальных конструкций представлены на Рисунке 4.2.4 – 4.2.7.

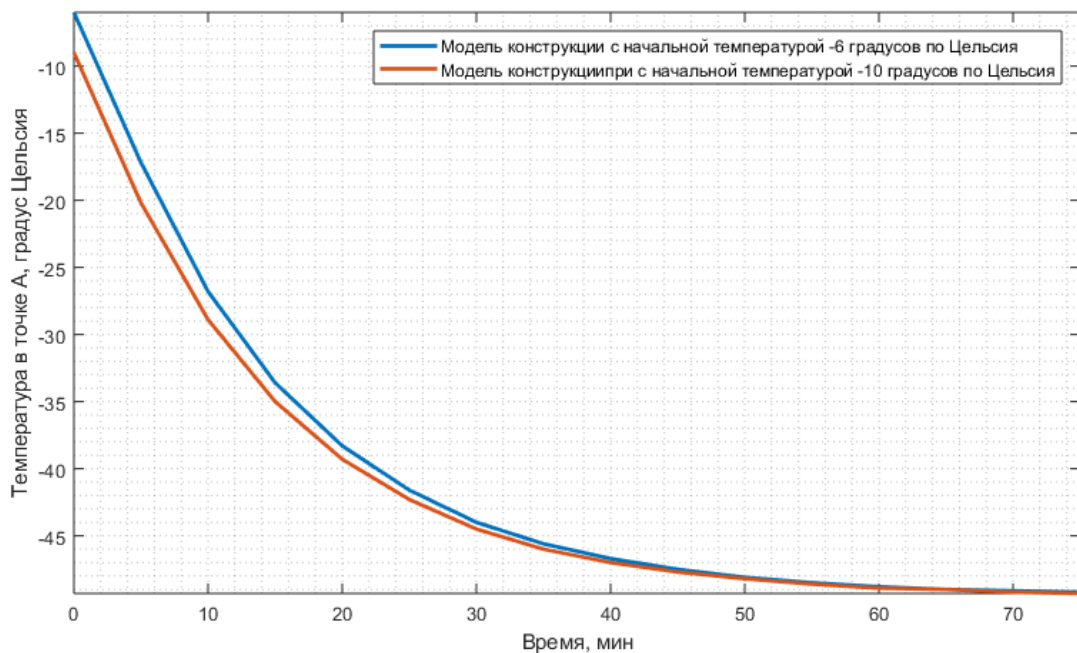


Рисунок 4.2.4 – Значение температур в точке A модели с трехслойной обшивкой в зависимости от времени, при воздействии минус 50°C .

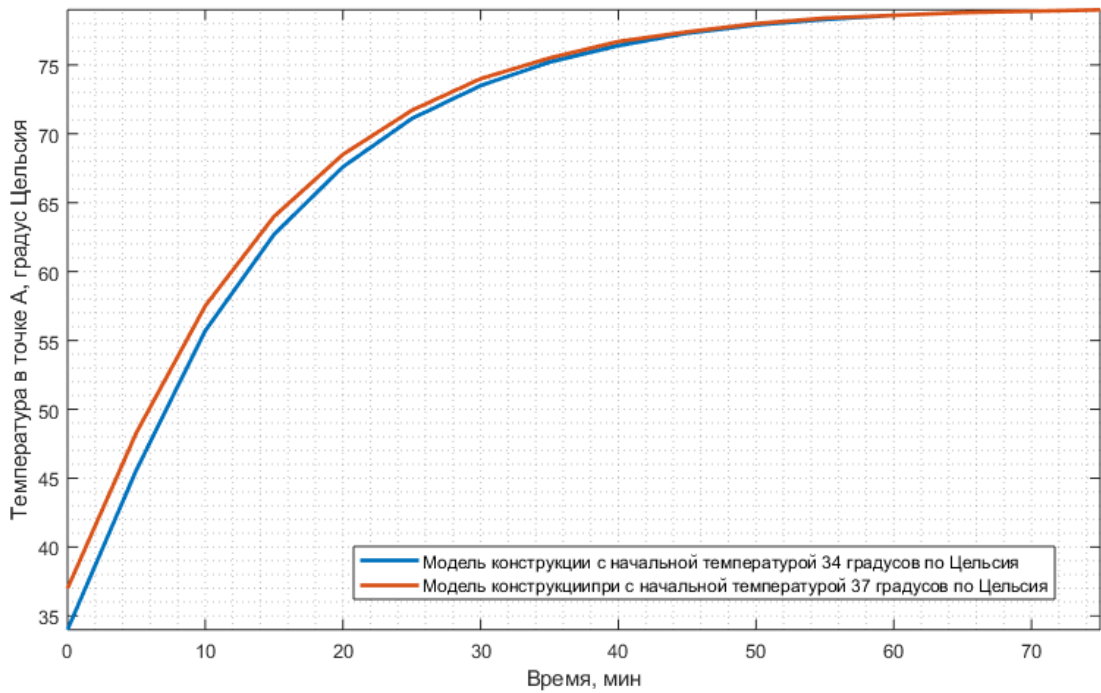


Рисунок 4.2.5 – Значение температур в точке А модели с трехслойной обшивкой в зависимости от времени, при воздействии плюса 80°C.

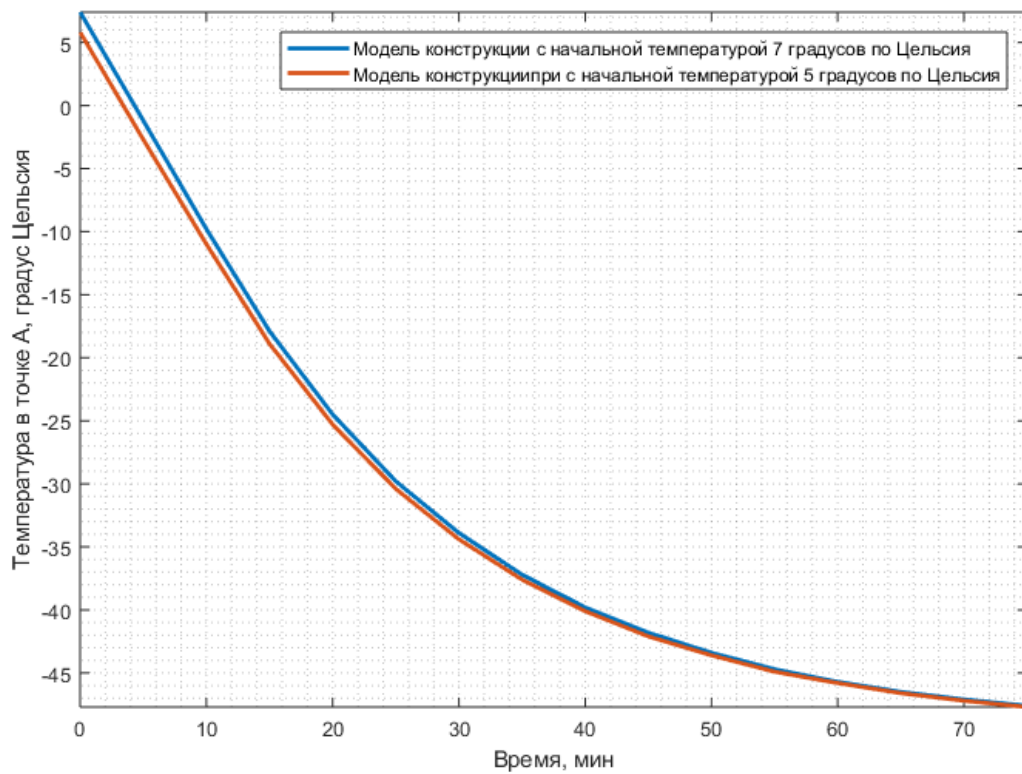


Рисунок 4.2.6 – Значение температур в точке А модели с семислойной обшивкой в зависимости от времени, при воздействии минуса 50°C.

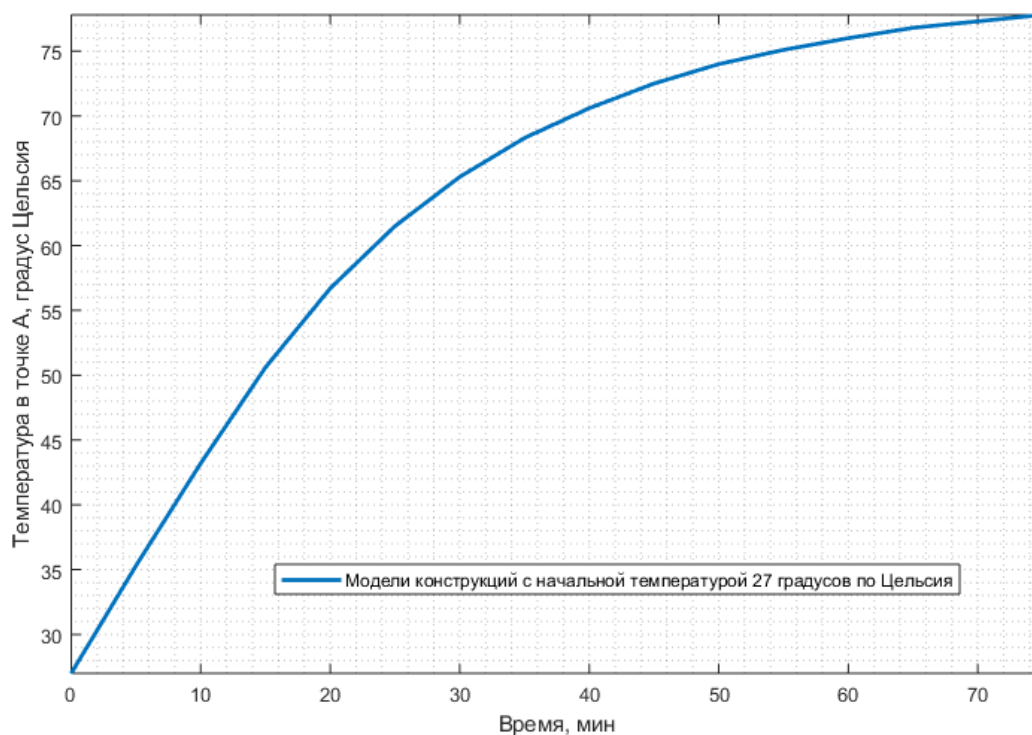


Рисунок 4.2.7 – Значение температур в точке *A* модели с семислойной обшивкой в зависимости от времени, при воздействии плюс 80°C.

Данными исследованиями теплопроводности моделей конструкций были получены кривые температур в точке *A*, зависящие от времени, при воздействии различных температур. Полученные кривые температур в точке *A* в теоретическом исследовании теплопроводности моделей конструкций позволяют дать возможность сравнить теоретические исследования с экспериментальными исследованиями теплопроводности конструкций и дать оценку результатам теоретических исследований, проведённых в диссертационной работе.

4.3 Сравнение теоретического и экспериментального исследования теплообмена многослойных конструкций

В этом разделе проводится сравнение полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований теплопроводности рассматриваемых конструкций.

Для сопоставления результатов исследований рассмотрим исходные данные экспериментальных исследований того отрезка времени воздействия температуры на конструкции, при котором температура воздействия приняло значения минус 50°C и плюс 80°C (время достижения данных температур воздействия в километрокамере составляют 25 мин и 12 мин соответственно). Температуры в этих отрезках времени во внутренней части конструкции при температуре воздействия минус 50°C для конструкции с трехслойной обшивкой составляют минус 5°C (образец №1) и минус 10°C (образец №3), а при воздействии температуры плюс 80°C температура во внутренней части конструкции имеет значения плюс 34°C (образец №1) и плюс 37°C (образец №3). Для конструкции с семислойной обшивкой, при температуре воздействия минус 50°C, температуры составляют плюс 7°C (образец №2) и плюс 6°C (образец №4), а при воздействии температуры плюс 80°C температура во внутренней части конструкции имеет значение плюс 27°C (образец №2, 4).

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, представлены на Рисунках 4.3.1 – 4.3.4.

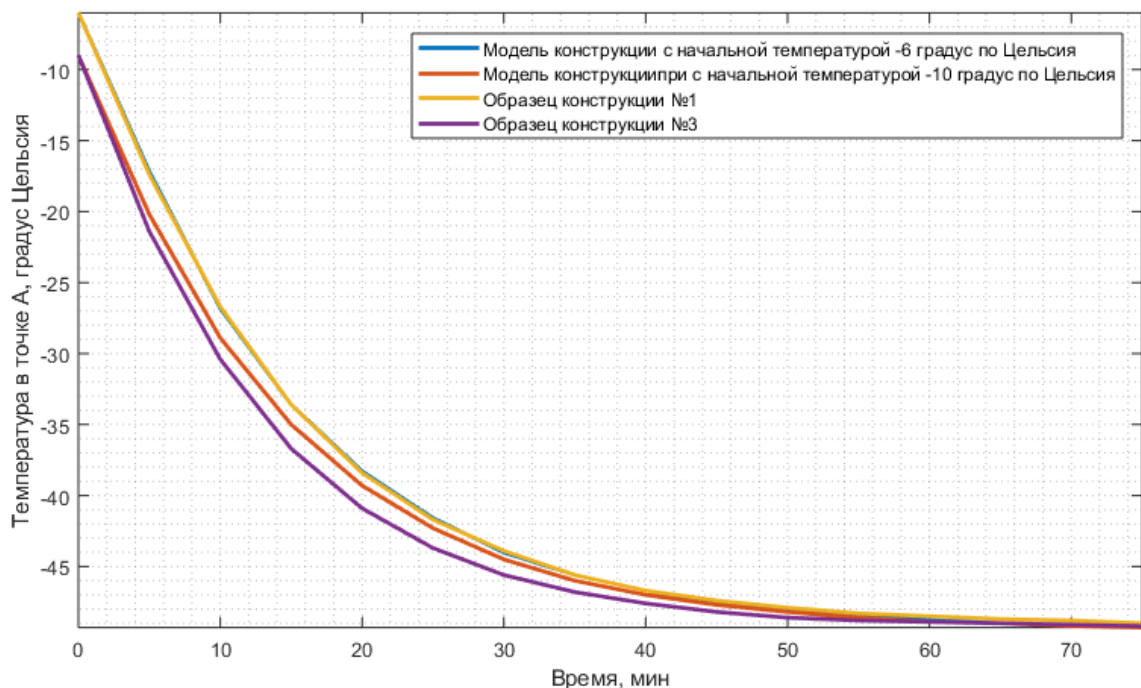


Рисунок 4.3.1 – Результаты исследований конструкции с трехслойной обшивкой при воздействии температуры минус 50°C

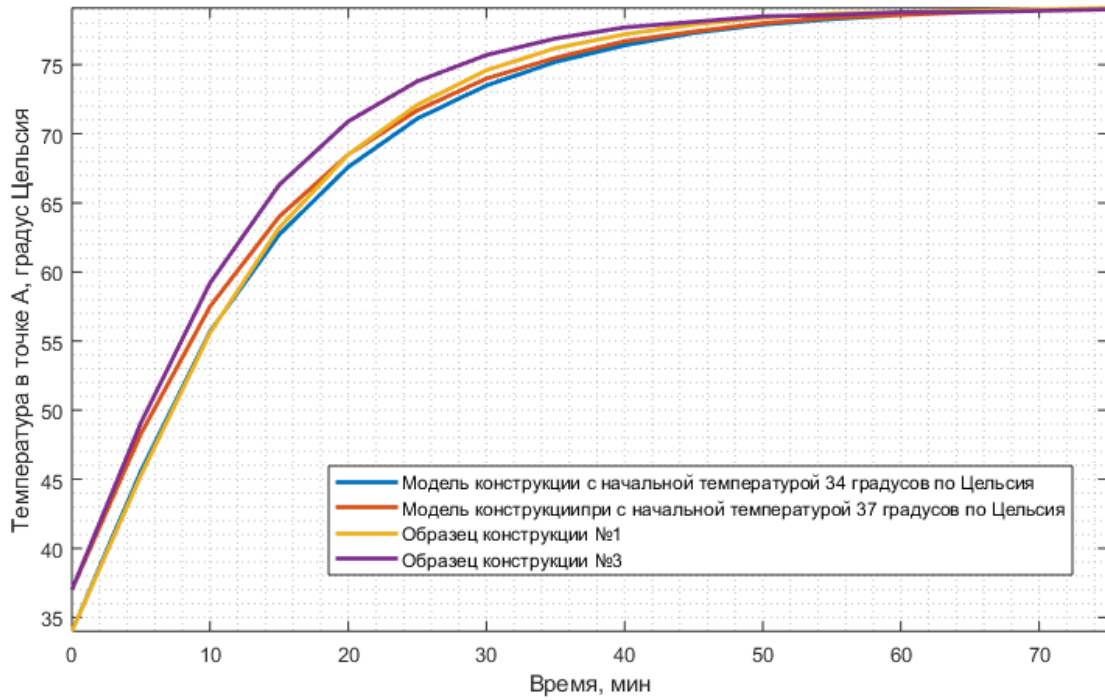


Рисунок 4.3.2 – Результаты исследований конструкции с трехслойной обшивкой при воздействии температуры плюс 80°C

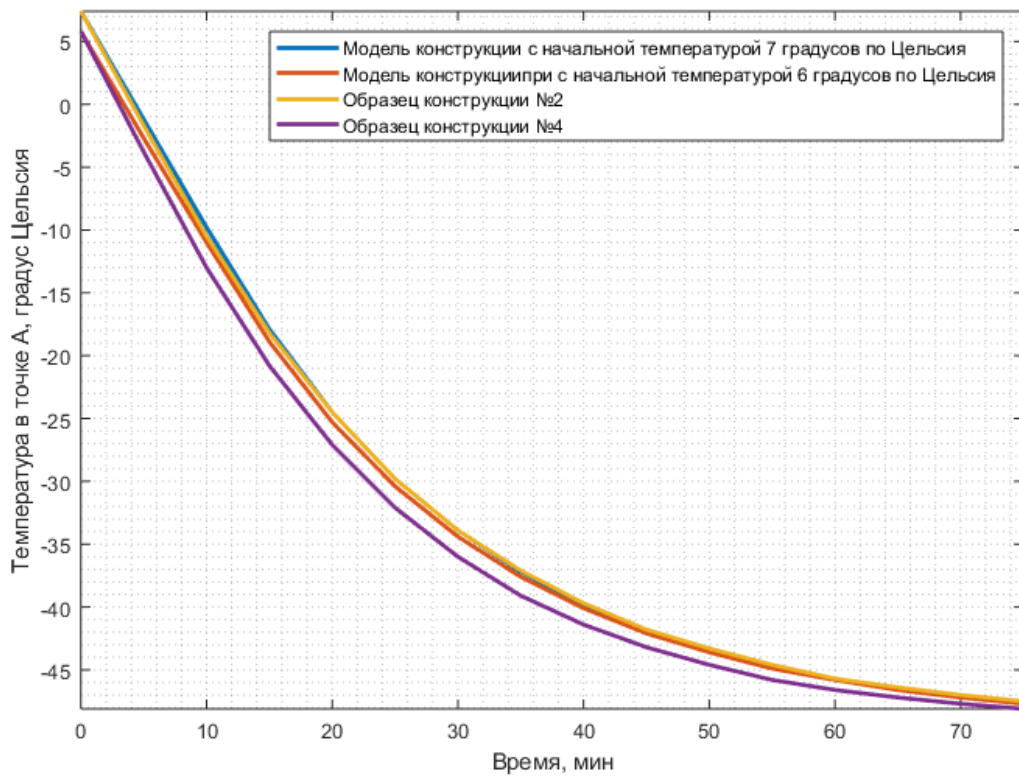


Рисунок 4.3.3 – Результаты исследований конструкции с семислойной обшивкой при воздействии температуры минус 50°C

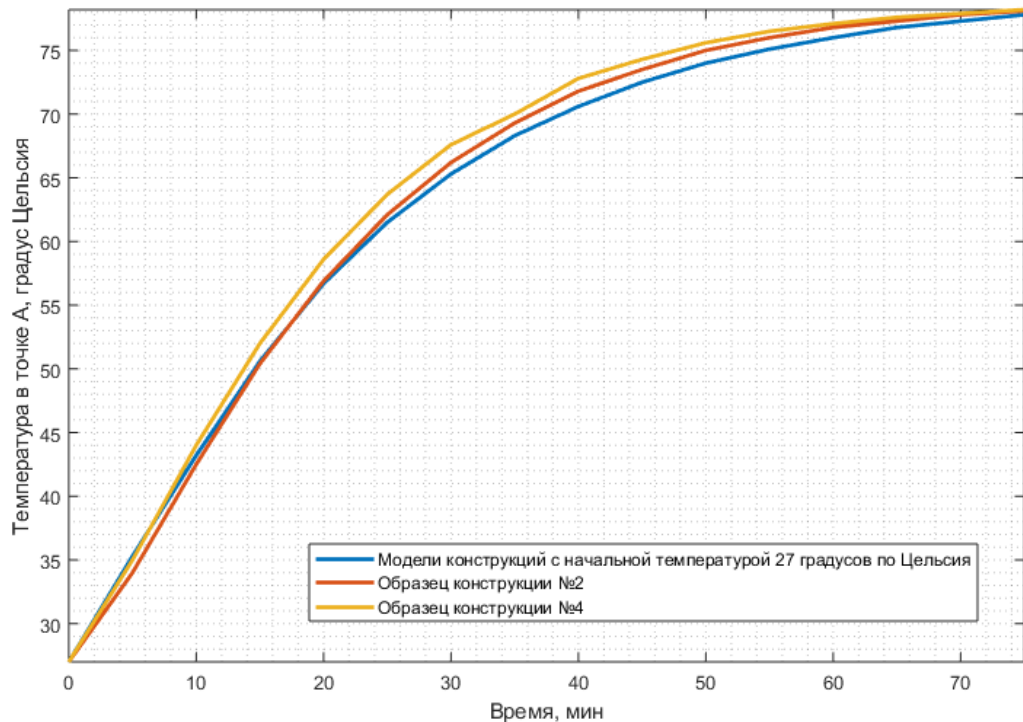


Рисунок 4.3.3 – Результаты исследований конструкции с семислойной обшивкой при воздействии температуры плюс 80°C

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических исследований показывают, что:

1) При воздействии температур минус 50°C на конструкцию с трехслойной обшивкой максимальное значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 6°C) и образца №1 составляет 0,3°C на участках времени 60-70 мин, а общая погрешность составляет 0,4%. Значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 10°C) и образца №3 составляет 3°C на участке времени 15 мин, а общая погрешность составляет 2%.

2) При воздействии температур минус 50°C на конструкцию с семислойной обшивкой максимальное значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 7°C) и образца №2 составляет 0,7°C на участке времени 10 мин, а общая погрешность составляет 2,5%. Значение разности температур между моделью (начальная температура

модели минус 6°С) и образца №4 составляет 2°С на участках времени 20-50 мин, а общая погрешность составляет 5%.

3) При воздействии температур плюс 80°С на конструкцию с трехслойной обшивкой максимальное значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 34°С) и образца №1 составляет 1,1°С на участке времени 30 мин, а общая погрешность составляет 0,6%. Значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 37°С) и образца №3 составляет 3°С на участке времени 20 мин, а общая погрешность составляет 1,3%.

4) При воздействии температур плюс 80°С на конструкцию с трехслойной обшивкой максимальное значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 27°С) и образца №2 составляет 1,2°С на участках времени 40-50 мин, а общая погрешность составляет 1%. Значение разности температур между моделью (начальная температура модели минус 27°С) и образца №4 составляет 3°С на участке времени 30 мин, а общая погрешность составляет 1,8%.

Заключение по главе 4

Результаты проведенных экспериментальных исследований теплопроводности конструкций показывают, что наилучшие показатели теплоизоляции имеет конструкция, в которой содержатся слои латуни (конструкция с семислойной обшивкой) по сравнению с конструкцией, где основная часть обшивки конструкции имеет слой минеральной ваты (конструкция с трехслойной обшивкой). Хотя общая толщина данных обшивок одинаковая. Теплоизоляционные показатели конструкции с семислойной конструкции превышают показатели конструкции с трехслойной обшивкой практически в 2 раза.

Результаты проведенных теоретических исследований теплопроводности моделей вышесказанных конструкций показывают, что

построенная математическая модель теплообмена в рассматриваемых конструкциях и ее метод вычисления имеет высокие показатели достоверности результатов. При чем, результаты теоретического исследования теплопроводности конструкций показывают, что образцы конструкций №3, 4 менее правдивы (имеет дефекты в конструкции) по отношению к образцам конструкций №1, 2, поскольку кривые температур теоретического исследования больше совпадают с кривыми температур образцов конструкций №1, 2, полученные в ходе экспериментальных исследований.

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.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АКБ	Аккумуляторная батарея
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
ВВД	турбовентиляторный двигатель
ДУ	Двигательная установка
КТИ	Теплоизоляционная конструкция
МКР	Метод конечных разностей
РАЭ	Радиоэлектронная аппаратура
СТ	Система термостатирования
ТВД	Турбовинтовой двигатель
ТРД	Турбореактивный двигатель

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулевич С.П., Веселов Ю.Г., Прядкин С.П., Тырнов С.Д. Анализ факторов, влияющих на безопасность полета беспилотных летательных аппаратов. Причины авиационных происшествий беспилотных летательных аппаратов и способы их предотвращения // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана «Наука и образование». – 2020. - №12. - С. 165-182.

2. Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Рогозин Е.А., Страшко О.В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского технического университета. Технические науки. – 2018. - Т. 45. - №2. - С. 125-139.

3. Рогозин Е.А., О.И. Бокова, Мельников А.В. Основные аспекты совершенствования методики оценки эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения // Вестник Воронежского института МВД России. – 2019. - №3. - С. 21-33.

4. Клименков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н., Харитонов А.М. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. - Т. 15. - №4. - С. 563-572.

5. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полета беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. - №1 - С. 7-15.

6. ГОСТ Р 59751-2021 Беспилотные авиационные системы с беспилотными воздушными судами самолетного типа. Требования к летной годности. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 126 с.

7. Решение коллегии МЧС России «О Временных единых технических требованиях к робототехническим комплексам, беспилотным летательным

аппаратам и прикладному программному обеспечению к ним» [Электронный ресурс].

8. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. №128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс].

9. Афонин А.Н., Липияйнен К.Л., Цепелев В.Ю. Карта среднемноголетней температуры воздуха за год, 2015.

10. Афонин А.Н., Липияйнен К.Л. Карта абсолютного минимума температуры воздуха за год, 2007.

11. Климат СССР. Районирование и статические параметры климатических факторов для технических целей. ГОСТ 16350-80. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 150 с.

12. Моисеев В.С. Беспилотные летательные аппараты: Отечественная история создания и современная классификация. Препринт. – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2022. – 40 с.

13. H. Shakhathreh, A. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. Shamsiah Othman, A. Khreishah, M. Guizani // “Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges,” IEEE Access. – 2019. - vol. 7. - PP. 48572–48634.

14. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.

15. Атмосфера стандартная. Параметры. ГОСТ 4401-81. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 181 с.

16. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. ГОСТ 15150-69. – М.: Стандартинформ, 2010. – 71 с.

17. Погорелов В.И. Беспилотные летательные аппараты: нагрузки и нагрев: учеб. пособие для СПО / В. И. Погорелов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018 – 230 с.

18. Попов С.А., Артамонова Л.Г., Кузнецов А.В. Аэродинамика летательных аппаратов: Учеб. пособие.– М.: Изд-во МАИ, 2016.– 96 с.

19. Маскайкин В.А. Теоретическое исследование температурных режимов обтекания осесимметричных тел транспортируемые на внешней подвеске летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2020. - №111 (электронный журнал).

20. Шехмейстер Е.И. Технология производства электровакуумных приборов: Учеб. для учащихся техникумов по спец. Производство изделий электр. техники». – М.: Высшая школа, 1992. – 543 с.

21. Городилин В.М. Регулировщик радиоаппаратуры – М.: Высш. Шк., 1983. – 176 с.

22. Ткаченко Ф.А. Электронные приборы и устройства – М.: Инфра-М, Новое знание, 2011. – 682 с.

23. Коняев Е.А., Немчиков М.Л. Авиационные горюче-смазочные материалы: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013. – 80 с.

24. Бокшицкий Л.В., Леонид Владимирович, Пастухов Д.И., Шумихин В.А., Брускин Д.Э., Давид Эммануилович. Автоматическое и электрическое оборудование летательных аппаратов: Учебник для подготовки офицеров запаса по профилям ВВС / Под ред. д-ра техн. наук и проф. Брускина Д.Э. – М.: Воениздат, 1969. – 560 с.

25. Красношарпа М.М., Евсеев П.П., Овечкин В.А., Старовский Б.А. Электроэнергетические системы летательных аппаратов [Текст]: Учебник для слушателей электротехн. фак. инж. вузов ВВС / Под ред. проф. М. М. Красношарпки; Киевское высш. инж.- авиац. воен. училище ВВС. - Киев: [б. и.], 1969. – 431 с.

26. Брускин Д.Э. Основы электрооборудования летательных аппаратов. Ч. 1. – М.: Высшая школа, 1978. — 303 с.

27. Кирилов А.В. Авиационные аккумуляторные батареи: учебное пособие – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 80 с.
28. Кудрявцева, Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования КА. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 226 с.
29. William R. Johnson. Thermal insulation for aircraft fuselage Pat. US 4291851A, Int. Cl. B32B 3/30, № 970,773 (1981).
30. Richard G. Struve, Randall S. Smith, Adam R. Weston. Foam composite insulation for aircraft. Pat. US 7040575 B2. Int. Cl. B64D L1/00, №10/708,858 (2006).
31. Як-42. Руководство по технической эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. - М.: ОКБ им. А. С. Яковлева, 1983. – 566 с.
32. Самолет Ту-134. Инструкция по технической эксплуатации (ИТЭ). Книга 2. – М.: ОАО «Туполев», 2001. – 450 с.
33. Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н. и др. Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. Книга 1. – М: Машиностроение, 1975. – 291 с.
34. Антонов О.К. (ред.) Пассажирский самолет АН-14. Техническое описание. - М.: 2-е изд. – АНТК им. О.К. Антонова, 1964. – 195 с.
35. Самолет Ан-148-100А (В, С). Руководство по технической эксплуатации (РЭ). Раздел 53 Фюзеляж. - М.: ГП АНТК им. О.К. Антонова, 2006. – 181 с.
36. Колах Микаел, Вентцел Ханс-Петер, Дольцински Вольф-Дитрих, Херман Ральф. Конструктивный компонент фюзеляжа самолета или космического летательного аппарата со слоем пены в качестве теплоизоляции. Пат. RU 2461491 С2, МПК В 64 С 1/00. № 2009124191/11; заявл. 18.01.2008; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26.
37. Monroe William Shumate, James W Stacy. Reinforced Insulation Product and System Suitable for Use in an Aircraft. Pat. US. 7278608 B2. Int. Cl. В 64 С 1/00, №11/167'864 (2007).
38. Варрик Н.М. Термостойкие волокна и теплозвукоизоляционные огнезащитные материалы // Труды ВИАМ. – 2014. - №6. (viam-works.ru).

39. Sami Movsesian, Jayant Dahyabhai Patel, Ted Workman, Marc A. Deramo. Modularized Insulation, Systems, Apparatus and Methods. Pat. US 7083147 B2. Int. Cl. B64C 1/10, № 10/800,308 (2006).

40. Фролов Ю.А., Васильев Н.В. Конструкция мата для теплозвукоизоляции (варианты). Пат. RU 138 897 U1, МПК В 64 С 1/40. № 2013143891/11; заявл. 01.10.2013; опубл. 27.03.2014. Бюл. № 9.

41. Орлов В.Г., Щербакова Т.Н., Телегин С.В., Мальков В.В., Александров В.Г. Пакет тепловой изоляции и способ его изготовления. Пат. RU 2459743 С1, МПК В64С 1/40. №2010151510/11; заявл. 16.12.2010; опубл. 27.08.2012. Бюл. №24.

42. Горяев А.Н., Будыка С.М., Измалкин О.С., Дмитриева А.А., Прохорчук Ю.А. Теплозащитное покрытие корпуса высокоскоростного летательного аппарата. Пат. RU 2 719 529 С1, МПК В 64 С 1/38. № 2019125016; заявл. 07.08.2019; опубл. 21.04.2020. Бюл. № 12.

43. Авиационные материалы: Справочник в 13-ти томах. Т. 9. Теплозащитные, теплоизоляционные и композиционные материалы, высокотемпературные неметаллические покрытия. – М.: ВИАМ, 2011. – 31 с.

44. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 // Авиационные материалы и технологии. – 2013. - №2 - С. 47-49.

45. Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Ермакова Ю.В., Боярская Р.В. Анализ свойств и особенностей функционирования высокопористых теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2013. - № 4 (93). - С. 120–129.

46. Гращенко Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе // Стекло и керамика. – 2012. - №4. - С. 32-36.

47. Лурье С.А., Полянский М.Н., Соляев Ю.О., Лыкосова Е.Д. Моделирование теплопроводности неоднородных материалов и структур //

Механика композиционных материалов и конструкций. Сборник трудов IV всероссийского симпозиума. – 2012. - Т.2. - С. 235-241.

48. Воробьев Н.Н., Баринов Д.Я., Зуев А.В., Пахомкин С.И. Расчетно-экспериментальное исследование эффективной теплопроводности волокнистых материалов // Труды ВИАМ. – 2021. - №7 (101). - С. 95-102.

49. Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых теплоизоляционных материалах // Тепловые процессы в технике. – 2014. - Т. 6. - №9. - С. 410-420.

50. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала // Труды ВИАМ. – 2014. - №2. (viam-works.ru).

51. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019 - №6 (78). - С. 32-42.

52. Vann Heng, Robert A. DiChiara, Jr. Thermal insulation assemblies and methods the fabrication the same. Pat. US 8357258 B2. Int. Cl. B29C 65/00, №12/983,918 (2013).

53. Christopher J. Stepanian, George L. Gould, Redouane Begag. Aerogel composite with fibrous batting. Pat. US 7078359 B2. Int. Cl. B32B 15/04, № 10/034,296 (2006).

54. Kang P. Lee, George L. Gould, William Gronemeyer, Christopher John Stepanian. Methods to produce gel sheets: pat. US 7399439. Int. Cl. B29C 39/4, №10/876103 (2008).

55. LG Chem, Ltd. Method for producing silica Aerogel and silica aerogel Produced thereby. Pat. US 11,279,622 B2. Int. Cl. CO1B 33/158, 16/069,677 (2022).

56. George L. Gould, Je Kyun Lee, Christopher J. Stepanian, Kang P. Lee. High Strength, nanoporous bodies reinforced with fibrous materials. Pat. US 7560062 B2. Int. Cl. C01B 33/152, №11/180038 (2009).

57. Kang P. Lee, George L. Gould, Christopher J. Stepanian. Advanced gel sheet production. Pat. US 7780890 B2. Int. Cl. B29C 39/4, №11/762654 (2010).

58. Mahendra Maheshwari, Xiaomei Fang. Laminate thermal insulation blanket for aircraft applications and process thereof. Pat. US 2012/0308369 A1. Int. Cl. B32B 3/00, №13/118867 (2012).

59. Shen Xiaodong, Wu Xiaodong, Cui Sheng, Shao Fengfeng. Preparation method of fiber-reinforced Al₂O₃-SiO₂ aerogel material with wave transmission and heat insulation integrated function. Pat. CN 104844149 A. Int. Cl. C04B 30/02, № 201510279154.3 (2015).

60. Cao Feng, Feng Jian, Jiang Yungang, Zhang Changrui. Ceramic composite material of high temperature insulation sandwich structure and method for preparing ceramic composite material. Pat. CN 102642350 A. Int. Cl. B32B 18/00, №2012101204420 (2012).

61. Su Lijun, Li Wenjing, Song Han, Zhang Fan, Liu Yunlong, Liu Bin, Pei Yuchen. External thermal insulation material and preparation method thereof. Pat. CN 106584942 A. Int. Cl. B32B 33/00, №201611114754.5 (2017).

62. Zhang Qiuhua, Wei Ronghui, Chen Wenjun, Zhou Wanling, Yuan Bing, Zheng Yali, no Liang Feng. Silicon dioxide aerogel with high specific surface area and fast preparation method thereof. Pat. CN 106672985 A. Int. Cl. C01B 33/16, № 20171005206.7 (2017).

63. Chen Chuanzhong, Wang Ruru, Xia Caizhong, Wu Jingyi. Preparation system and preparation method of gel composites. Pat. CN 101357321 A. Int. Cl. B01J 20/10, № 200810200036.9 (2008).

64. Stephen A. Steiner III Justin S. Griffin Ryan T. Nelson. Packaging method for aerogel felts, and aerogel felt packaged product. Pat. CN 107849348 A. Int. Cl. C08L 75/00, № 201680031011.3 (2018).

65. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

66. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.

67. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
68. Лыков А.В. Теплообмен: (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
69. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло и массообмен / Й. Джалурия; пер. с англ. С. Л. Вишневого. – М: Мир, 1983. – 399 с.
70. Шеремет М.А. Математическое моделирование естественной конвекции в замкнутой квадратной полости с теплопроводными стенками конечной толщины // Физ.-мат. – 2011. - №1/2. - С. 3-8.
71. Шеремет М.А. Нестационарная сопряженная задача термогравитационной конвекции в горизонтальном цилиндре // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2010. - №2. - С. 102-111.
72. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. – 141 с.
73. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. Пособие. – Томск: STT, 2016. – 92 с.
74. Самарский А.А., Выбишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
75. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Идентификация физических свойств высокопористых волокнистых материалов методом статистического моделирования // Вестник Московского авиационного института. – 2008. - Т.15. - № 5. - С. 109-117.
76. Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов // Тепловые процессы в технике. – 2009, Т.1. - №2. - С. 49-60.
77. Алифанов О.М., Иванов Н.А., Колесников В.А., Меднов А.Г. Определение температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т.16. - №5. - С. 247-254.

78. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Ненарокомов К.А., Терентьева А.В., Титов Д.М. Конечно-разностный метод решения обобщенной краевой задачи для уравнения гиперболического типа в многослойной области // Вестник Московского авиационного института. – 2013. - Т.20. - №5. - С. 196-206.

79. Дульнев Г.Н., Новиков Н.Н. Процессы переноса в неоднородных средах. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1991. – 248 с.

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

81. Маскайкин В.А., Махров В.П. Исследование теплопроводности многослойной теплоизоляционной обшивки летательных аппаратов в условии полета // Вестник Московского авиационного института, выпуск 2021 г., Т. 28, № 4, с. 118-130.

82. Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В. Определение эффективных теплофизических характеристик композиционного материала // Физическая мезомеханика. – 2008. - Т.11. - №5. - С. 103-110.

83. Мелентьев Р.Ю. Определение теплопроводности полимерных композиционных материалов // Научный вестник ДГМА. – 2013. - №2 (12Е). - С. 123-130.

84. Салосина М.О., Алифанов О.М., Ненарокомов А.В. Проектирование тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов // Тепловые процессы в технике. – 2019. - Т.11. - №8. С. 345-354.

85. 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.

86. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд., испр. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 616 с.

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

88. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. – Л.: «Энергия», 1974. – 264 с.

89. Стекловолокно. Ровинги. Технические условия. ГОСТ 17139-2000 – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 11 с.

90. Казанцев Е. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: «Металлургия», 1975. – 366 с.

91. Донской А.А., Григорян Г.В. // Клеи. Герметики. Технологии. – 2007. - №1. - С. 6 – 12 с.

92. Корнеев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: МГОУ, 2000. – 72 с.

93. 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.

94. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972. – 721 с.