



БОРИСОВА Алина Игоревна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Бурковский Виктор Леонидович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шацкий Владимир Павлович,**
доктор технических наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра высшей математики и теоретической механики, профессор.

Слюсарев Михаил Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ВУНЦ ВВС «Воронежская военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», кафедра криогенных машин, установок и электрогазовой техники, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк).

Защита диссертации состоится «26» марта 2021 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.037.13, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ауд. 216

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «19» февраля 2021 г.

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



Гусев К.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях значительное внимание уделяется развитию прикладных средств моделирования и анализа процессов переноса (диффузия, теплопроводность, внутреннее трение) при решении большого числа практических задач в различных объектных областях, в том числе связанных с тепловыми процессами в рамках сложных электротехнических комплексов (ЭТК). Данные комплексы реализуют соответствующие процессы функционирования, как в качестве самостоятельных элементов, так и аппаратных средств обеспечения работы систем управления в рамках, например, летательных аппаратов космического назначения. Данные ЭТК относятся к сложноструктурированным распределенным объектам, требующим размещения в принципиально ограниченных объемах. В этих условиях при их разработке необходимо, прежде всего, учитывать температурные режимы эксплуатации, а также теплового взаимодействия для поддержания энергоэффективной, надежной и безопасной работы.

Необходимость предпроектного исследования теплового состояния элементов электротехнических комплексов, входящих в состав соответствующих автономных объектов, обусловлена жесткими условиями их эксплуатации, которые требуют учета соответствующих факторов, например для космических аппаратов (КА): изменение в широких пределах свойств окружающей среды по температуре ($-50^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$) и давлению (от 101323 до 2485 Па); влияние тепловых потоков от внешних источников тепла (солнце, двигатели, оболочка аппарата); неоднородность теплофизических свойств элементов.

При этом перечисленные факторы могут изменяться во времени в зависимости от скорости перемещения КА. В результате чего изменяются теплопроводность и теплоемкость среды, соответственно, коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, и в результате распределение тепловых потоков непрерывно меняется. При этом работа электротехнического комплекса должна надежно обеспечивать функционирование автономного объекта с учетом негерметичных аппаратных отсеков и теплового взаимодействия электромеханической и электронной частей объекта.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени разработано большое количество методов моделирования и анализа тепловых полей и их модификаций: метод сведения задачи теплового расчета к эквивалентной схеме замещения; метод конечных разностей; метод конечных элементов. Следует отметить, что в большинстве случаев характеристики сред предполагаются либо фиксированными, либо нелинейными, но не зависящими от времени.

Средства моделирования тепловых полей совершенствуются в основном на базе метода конечных элементов. При этом существует ряд задач, связанных с моделированием теплового взаимодействия контактных областей или многослойных конструкций, в которых размеры анализируемых областей значительно различаются. Это требует разбиения расчетных областей на огромное количество элементов, особенно в трехмерном варианте. В результате время решения таких задач существенно возрастает, а эффективность процесса моделирования падает. При этом требуются значительные вычислительные ресурсы.

Большой вклад в развитие методов решения задач, рассматриваемых в диссертации, внесли российские ученые И.П. Боляев, А.И. Борисенко, Ю.К. Васильев, Э.И. Гуревич, И.М. Постников, Г.Г. Счастливый, И.Ф. Филиппов, А.И. Яковлев, Г. А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан, а также зарубежные ученые О. Бем, Г. Готтер, Р. Зодерберг, К. Треттин, И. Хак и другие.

Вместе с тем, следует обратить внимание на отсутствие теоретических результатов, обеспечивающих реализацию обобщенного подхода к построению математических моделей тепловых процессов в рамках отдельных распределенных типовых объектов (электромеханических, электронных, электрических) сложноструктурированных электротехнических комплексов, а также в области адекватного математического описания процессов их теплового взаимодействия, что особенно важно в условиях обеспечения высокой надежности в экстремальных ситуациях (например, запуск и функционирование на орбите КА, использование электротехнических комплексов в рамках экстремальных производств).

Таким образом, актуальность тематики диссертационного исследования продиктована необходимостью дальнейшего развития средств построения математических моделей тепловых процессов, протекающих в рамках распределенных электромеханических, электронных, электрических объектов ЭТК, а также процессов их теплового взаимодействия, обеспечивающих их численный анализ с высокой точностью и быстродействием.

Тематика диссертационной работы соответствует одному из научных направлений Воронежского государственного технического университета «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

Объектом исследования являются тепловые процессы, в том числе теплового взаимодействия в рамках распределенных объектов сложноструктурированных электротехнических комплексов.

Предметом исследования выступают математические модели анализа температурных полей, учитывающие формы оболочек объектов, взаимных контактных областей и многослойных конструкций сложноструктурированных электротехнических комплексов.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в развитии средств, построении математических моделей, а также их численной реализации в условиях тепловых процессов и их взаимодействия в рамках электромеханических, электронных, электрических объектов сложноструктурированных электротехнических комплексов, обеспечивающих реализацию обобщенного подхода к их анализу и принятию технических решений.

В соответствии с данной целью в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- анализа проблематики моделирования сложных тепловых полей, в том числе в процессе их взаимодействия в рамках сложноструктурированных электротехнических комплексов и систем;
- разработки математической модели обремененных охлаждаемых поверхностей типовых объектов электротехнических комплексов;

- разработки математических моделей кусочно-однородной многослойной среды без внутреннего тепловыделения с учетом тепловыделения в активных частях многослойной конструкции;
- разработки математической модели анализа тепловых полей распределенных объектов ЭТК с учетом изменения параметров окружающей среды;
- разработки средств численного анализа моделей тепловых процессов в рамках распределенных объектов ЭТК, а также их взаимодействия с учетом специфических особенностей теплообмена;
- разработки программного обеспечения моделей анализа тепловых процессов в рамках распределенных объектов сложноструктурированных электротехнических комплексов и его апробация в условиях ЭТК космических аппаратов.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы методы теории математического моделирования, вычислительной математики, теории температурных полей, теории теплопередачи.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: п. 2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»; п. 4 «Реализация численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Научная новизна. В результате проведенных исследований в работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

- разработана модель оребренных охлаждаемых поверхностей типовых объектов ЭТК, отличающаяся реализацией предложенного метода тепловых схем с учетом свойств взаимных контактных областей отдельных объектов электротехнических комплексов;
- разработана модель кусочно-однородной многослойной среды без внутреннего тепловыделения с учетом тепловыделения в активных частях многослойной конструкции, базирующаяся на предложенном методе перехода от кусочно-однородной многослойной среды к эквивалентной сплошной с анизотропными свойствами;
- предложена математическая модель анализа тепловых полей распределенных объектов ЭТК, отличающаяся возможностью учета изменения параметров окружающей среды;
- предложены средства численного анализа моделей тепловых процессов в рамках распределенных объектов ЭТК, отличающиеся использованием предложенного метода минимизации числа расчетных элементов на основе критериальных уравнений теплового баланса как для стационарных, так и нестационарных условий теплообмена;

- предложена структура комплекса программного обеспечения моделей анализа тепловых процессов в рамках распределенных объектов ЭТК, отличающаяся реализацией механизмов взаимодействия с инструментальными системами численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость полученных в работе результатов состоит в модификации математических моделей анализа тепловых процессов в кусочно-однородной среде, разработке метода учета свойств взаимных контактных областей распределенных объектов сложноструктурированных электротехнических комплексов, метода перехода от многослойной среды к эквивалентной сплошной с анизотропными свойствами.

На основе разработанных математических моделей и средств численного анализа создан программный комплекс, позволяющий осуществлять исследование плоскопараллельных и трехмерных тепловых полей сложноструктурированных электротехнических комплексов с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель обретенных охлаждаемых поверхностей типовых объектов электротехнических комплексов адекватно отражает особенности теплообмена таких поверхностей с окружающей средой;

- математические модели кусочно-однородной многослойной среды без внутреннего тепловыделения и с учетом тепловыделения в активных частях многослойной конструкции позволяют реализовать предложенный метод перехода от кусочно-однородной многослойной среды к эквивалентной сплошной с анизотропными свойствами;

- метод минимизации числа расчетных элементов на основе критериальных уравнений теплового баланса реализует модели анализа тепловых процессов в распределенных ЭТК.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы нашли практическое применение в работе ЗАО «НИИ МЕХАНОТРОНИКИ-АЛЬФА-НЦ». Теоретические результаты внедрены в учебный процесс на кафедре электропривода, автоматики и управления в технических системах Воронежского государственного технического университета в рамках учебных курсов «Теория электропривода», «Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в электроприводах».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: V Международной научно-практической конференции «Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности» (Воронеж, 2017 г.), Международной научно-технической и научно-методической конференциях «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2017), International Scientific Conference on High Speed Turbomachines and Electrical Drives (SPb, 2019), Международной научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2019), а

также на научных семинарах кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах (2017-2020).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 17 научных работах, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в изданиях, индексируемых в базе Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: анализ теплообмена в электротехническом комплексе [3,5,6,8,9,10,11], математическое моделирование тепловых процессов в электротехническом комплексе [4,7,12,13,16,17], влияние тепловых процессов в электротехническом комплексе [1,2,14,15].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 147 страницах, включает 50 рисунков, 19 таблиц. Список литературы включает 141 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования с указанием цели и задач исследования. Отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена общему анализу моделей тепловых процессов распределенных объектов электротехнических комплексов и моделей их теплового взаимодействия. Рассмотрены подходы к численной реализации математических моделей и анализу инструментальных систем конечно-элементного моделирования. Развитие математического моделирования процесса теплообмена ЭТК обусловлено не столько недостаточностью математических методов и вычислительного обеспечения, сколько сложностью и неопределенностью внутри агрегатных процессов в совокупности с необходимостью интерактивного экспериментального их подтверждения при доведении до инженерных расчетов, обеспечивающих необходимую надежность. Анализ таких исследований позволяет определить температурное поле ЭТК с учетом детальной информации о конструкции, мощности тепловыделения и теплоемкости. Это связано с необходимой компенсацией тепловой напряженности, прежде всего электронной составляющей, ограничиваемой возможностями теплоизлучающих процессов.

Оптимизация совокупных показателей качества ЭТК, на основе методов компонентно-модального управления с формированием эффективных коэффициентов обратных связей, регламентирует возможности системного анализа объекта с математическим моделированием энергетических соотношений в нем.

Среднее значение тока и мощности в цепи источника питания:

$$P_{\text{ип}} = I_{\text{ип}} \cdot V_{\text{п}}. \quad (1)$$

Мощность, потребляемая электродвигателем от источника постоянного тока, определяется соотношением:

$$P_{av} = I_{cp.u.n.v} \cdot U_n = \frac{U_n^2}{3r} \left\{ \left[2 - 2e^{-\beta_0(1-\gamma'_v)} + \frac{\nu}{n_u} \frac{(e^{\beta_0\gamma'_v} - 1)}{(e^{\beta_0} - 1)} \cdot \frac{(1 - e^{-\beta_0 \frac{n_u}{\nu}})^2}{1 + e^{-3\beta_0 \frac{n_u}{\nu}}} \right] - \right. \\ \left. - \frac{3}{\pi} \cdot \frac{E_0 \cdot U_n \cdot K_E}{\sqrt{r^2 + x_c^2 \nu^2}} \cdot \cos \left[\frac{\pi \nu}{6n_u} (1 - \gamma'_v) + \theta_v + \theta_{\max \nu} \right] \frac{\sin \frac{\pi \nu}{6n_u} \cdot \gamma'_v}{\sin \frac{\pi \nu}{6n_u}} \right\} \quad (2)$$

Дополнительные потери мощности в электродвигателе $-\Delta P_{авнec}$, обусловленные наличием несинусоидальности форм выходного напряжения электронной части, с достаточной достоверностью определяются методом сравнения мощностей, потребляемых через $-P_{av}$, и к эквивалентным источникам синусоидального напряжения по первой гармонической составляющей – $P_{ип}$ через соотношение:

$$\frac{\sin^2 \frac{\pi \nu}{6n_u} \cdot \gamma'_v}{\sin^2 \frac{\pi \nu}{6n_u}} \cdot \left\{ \cos \left[\frac{\pi \nu}{6n_u} (1 - \gamma'_v) + \theta_v + \theta_{\max \nu} \right] - \cos(\theta_v + \theta_{\max \nu}) \right\} \quad (3)$$

Задача развития соответствующих программных средств включает в себя создание дополнительных функциональных модулей, обеспечивающих комплексное исследование технических проблем ЭТК.

Среди существующего многообразия программных продуктов, предназначенных для решения таких задач, можно выделить три универсальных пакета такого рода: **ANSYS** – один из первых пакетов конечно-элементного анализа, **Femlab** - интегрируемый в **Mathlab** новейший пакет для решения задач. **ELCUT** - практически единственный отечественный пакет, пригодный для моделирования ЭТК. Таким образом, при сравнении этих программ, **ELCUT** на первый взгляд обладает ограниченными возможностями по отношению к другим программам. Но некоторые ограничения достаточно легко преодолеваются. Например, **ELCUT** не позволяет моделировать трехмерные объекты, однако существует множество объектов, являющихся с точки зрения геометрии телами вращения, а осесимметричные задачи с помощью **ELCUT** решаются и дают те же результаты, что и в трехмерной постановке. **ELCUT** позволяет решать двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции, а также задачи расчета напряженно-деформированного состояния твердого тела. Пакет **ANSYS** позволяет моделировать переход материала из твердого состояния в жидкое и наоборот. Однако сложность интерфейса программы, большое число параметров ее настройки и почти полное отсутствие учебников по программе на русском языке

затрудняют ее использование. Пакет **Femlab** обладает простым и понятным интерфейсом, как **ELCUT**, и имеет практически те же расчетные возможности, что и **ANSYS**. Кроме этого, **Femlab** является по сути инструментом пакета **Mathlab** и работает под его управлением. Это означает, что все возможности программирования, доступные в **Mathlab**, могут быть использованы и в **Femlab** (например при обработке результатов расчета).

Таким образом, в зависимости от сложности решаемой задачи и требований по точности представления характеристик тепловых процессов реального объекта, можно выбрать конкретный пакет для проверки адекватности разрабатываемой математической модели.

В работе с помощью программного пакета **ELCUT** проведен анализ адекватности результатов анализа тепловых процессов на основе разработанных математических моделей.

Во второй главе рассмотрены подходы к разработке средств анализа тепловых процессов в рамках распределенных объектов ЭТК на основе построения моделей оребренных охлаждающих поверхностей, а также средств их машинной реализации. Условия теплообмена на поверхности могут меняться в зависимости от изменения внешних условий. Использование такого теплостока предопределяет наличие в тепловой системе трех видов теплообмена: теплопроводности или кондукции в твердых телах, конвекции и радиации на границе твердых тел с внешней средой. За перенос теплоты теплопроводностью отвечает закон Фурье, конвективный перенос теплоты описывается законом Ньютона – Рихмана и законом Стефана – Больцмана при переносе тепловой энергии за счет радиации или излучения.

В случае теплопроводности или конвекции перенос энергии между частями тела зависит от разности температур этих частей в первой степени, а при переносе тепловой энергии за счет радиации или излучения теплообмен зависит от разности абсолютных температур, где каждая составляющая в четвертой степени.

Математическая модель, допускающая аналитическое описание, связана с решением дифференциального уравнения для прямоугольной формы ребра при пренебрежении теплообменом с торцевой части:

$$\frac{d^2 \Theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda b} \cdot \Theta = 0, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи охлаждаемой поверхности, Вт/(м²К); λ – коэффициент теплопроводности материала ребра, Вт/(м·К); b – толщина ребра; Θ – превышение температуры ребра над температурой окружающей среды.

Решение уравнения имеет следующий вид:

$$\vartheta = \vartheta_0 \cdot (ch mx - th mh \cdot sh mx), \quad (5)$$

где θ_0 – температура в основании ребра ($x=0$), °К; m – коэффициент равный $m = \sqrt{2\alpha/(\lambda b)}$.

Рассмотренная математическая модель не позволяет проанализировать все многообразие возможных форм ребер, а также переоблучение поверхности ребер в условиях лучистого теплообмена при отсутствии конвекции. Однако возможность определения теплового потока P_0 через ребро позволяет воспользоваться понятием термического сопротивления ребра R_p :

$$R_p = \frac{\Theta}{P_0} = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\alpha \cdot \lambda b} \operatorname{th}\left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda b}} \cdot h\right)}, \quad (6)$$

где L – аксиальная длина ребра, м; h – высота ребра, м.

Исследование других форм ребер охлаждения возможно путем численного моделирования процесса теплопередачи. В табл. 1 представлены типовые формы профилей форм охлаждения, для которых в работе проведены исследования на основе технологии математического моделирования. Для оценки эффективности различных форм ребер целесообразно задать тепловой поток, проходящий через основание ребра и определить температуру соответствующих поверхностей.

Таблица 1

Типовые формы ребер охлаждающих поверхностей

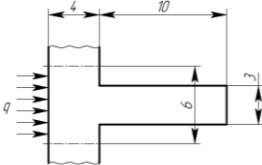
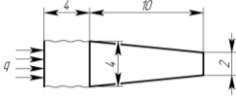
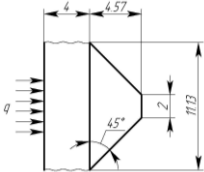
Условное обозначение формы	Вид
P1	
P2	
P3	

Таблица 1 (продолжение)

Условное обозначение формы	Вид
P4	
P5	
P6	

В этом случае коэффициент эффективности может быть определен по соотношению термических проводимостей ($k_{эф} = \gamma_0 / \gamma_m$), где γ_0 – термическая проводимость ребра с учетом его теплопроводности λ и теплоотдачи с поверхности ребра α ; γ_m – идеальная теплопроводность, при которой поверхность ребра имеет одинаковую температуру θ_0 при выполнении условия, λ равна бесконечности. На рис.1-10 приведены и сведены в табл. 2, 3 полученные в работе результаты реализации технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента оребренных охлаждающих поверхностей.

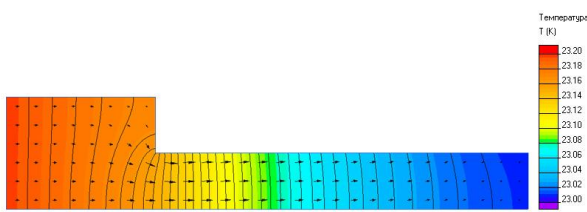


Рис. 1. Температурное поле ребра при нормальных условиях (P1HC_00)

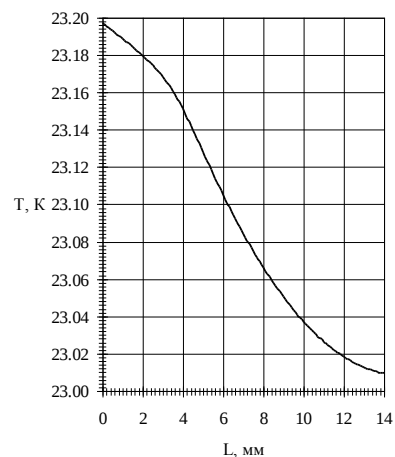


Рис. 2. График изменения температуры по оси симметрии (модель P1HC_00)

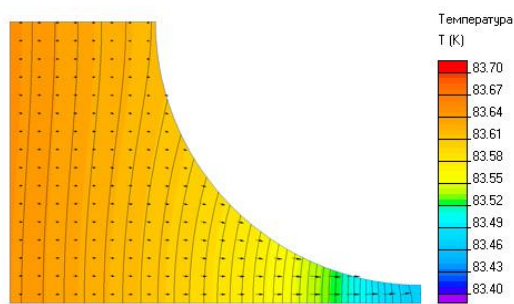


Рис. 3. Температурное поле ребра при нормальных условиях (P5HC_00)

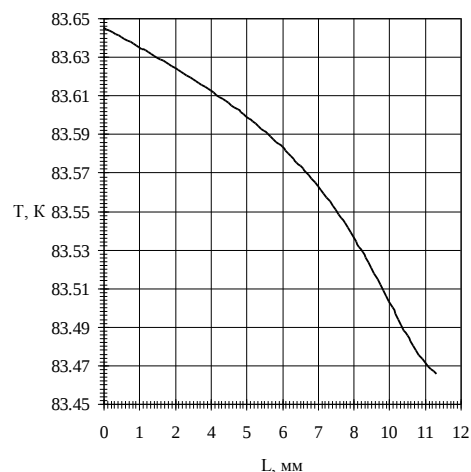


Рис. 4. График изменения температуры по оси симметрии (модель P5HC_00)

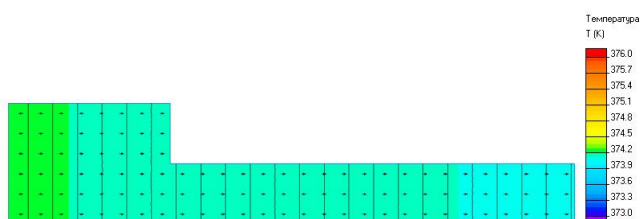


Рис. 5. Температурное поле ребра (P1KC_00) в условиях космоса

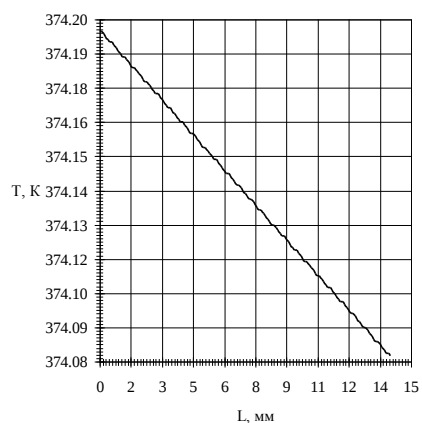


Рис. 6. График изменения температуры по оси симметрии (модель P1KC_00)

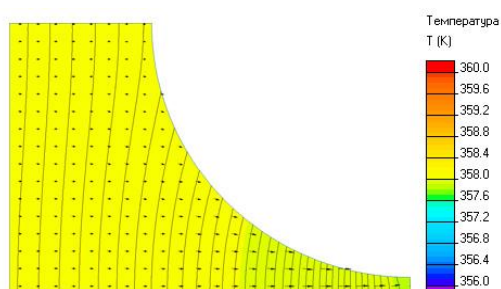


Рис.7. Температурное поле ребра (P5KC_00) в условиях космоса

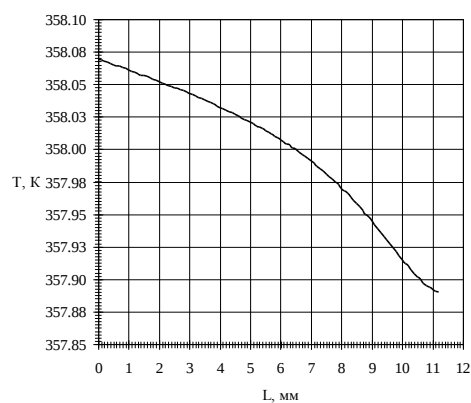


Рис. 8. График изменения температуры по оси симметрии (модель P5KC_00)

Таблица 2

Результаты сравнения данных моделирования температурного поля ребер в нормальных условиях

Номер модели	Обозначение модели	γ_0	γ_m	$k_{эф}$	$k_{эф}^*$
1	P1HC_00 (O)	1.2125E-03	1.2253E-03	0.989537	0.990719
2	P2HC_00 (O)	0.9687E-03	9.7858E-04	0.989985	0.991167
3	P3HC_00 (O)	1.3650E-03	1.3668E-03	0.998683	0.999876
4	P4HC_00 (O)	1.3335E-03	1.3353E-03	0.998644	0.999837
5	P5HC_00 (O)	2.2694E-03	0.00227245	0.998807	1.000000
6	P6HC_00 (O)	1.3891E-03	0.0013912	0.998519	0.999712

Таблица 3

Результаты сравнения данных моделирования температурного поля ребер в условиях космоса

Номер модели	Обозначение модели	γ_0	γ_m	$k_{эф}$	$k_{эф}^*$
1	P1KC_00	7.5540E-05	7.5570E-05	0.999603	0.999850
2	P2KC_00	2.3740E-05	2.3750E-05	0.999579	0.999826
3	P3KC_00	28.031E-05	28.319E-05	0.999753	1.000000
4	P4KC_00	27.463E-05	27.471E-05	0.999709	0.999956
5	P5KC_00	53.046E-05	53.061E-05	0.999717	0.999964
6	P6KC_00	28.519E-05	28.527 E-05	0.999720	0.999967

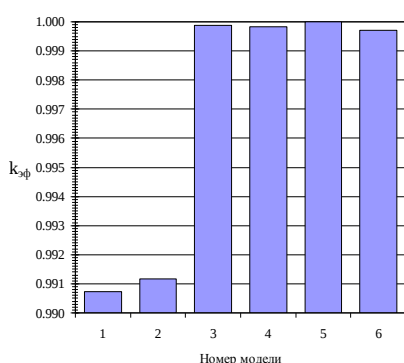


Рис. 9. Результаты сравнения данных моделирования температурного поля ребер в нормальных условиях

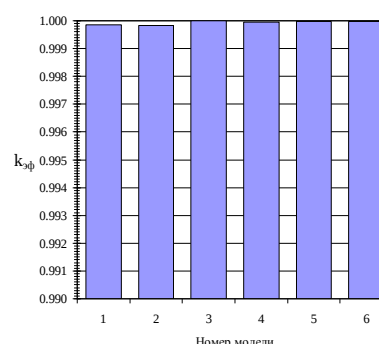


Рис.10. Результаты сравнения данных моделирования температурного поля ребер в условиях космоса

Предложенная в работе математическая модель адекватно отражает особенности теплообмена ребренных поверхностей с окружающей средой. Эффект от увеличения поверхности охлаждения объекта за счет ребер оказывается несколько меньше ожидаемого. Однако применение прямых ребер с оптимальной формой теплопроводящего профиля позволяет получить новое качество оболочек в сочетании высокой прочности и жесткости оболочки при расположении прямых ребер в зависимости от расположения теплостока объекта. Численная реализация математической модели связана с решением системы алгебраических уравнений. При записи данной системы в матричной форме получаем матрицу системы разреженного вида. Необходимо отметить, что огромные разреженные матрицы обычно возникают при решении таких задач, как дифференциальные уравнения в частных производных. Они присутствуют практически во всех известных численных методах (метод конечных элементов, метод конечных разностей и т.п.). Методы решения таких систем известны, и численная реализация не составляет трудностей. Особую сложность решения представляют дифференциальные уравнения конвективного процесса. В основе описания этих процессов лежит уравнение Навье – Стокса, которое не может быть решено в общем виде. Поэтому в работе при записи граничных условий коэффициенты теплоотдачи считаются заданными и определяются по известным критериальным уравнениям.

В третьей главе представлены математические модели кусочно-однородной многослойной среды, как с внутренним тепловыделением, так и без него, а также модели с учетом изменения параметров окружающей среды и средств численной реализации.

Контактный теплообмен присутствует как в электромеханической части ЭТК, так и в его электронной части. При контактном теплообмене осуществляется теплоперенос в зоне стыка сопряженных элементов тепловой системы, в которых теплота передается теплопроводностью. Особенности практической реализации математических моделей связаны со значительной разницей размеров контактной области (мкм) и активных элементов ЭТК (мм). В результате разбиения расчетной области на элементарные составляющие приводит к значительному увеличению числа элементов, особенно в трехмерном случае. При этом встречаются шихтованные структуры, где контактные области повторяются многократно.

Целесообразно для построения математической модели теплового контакта заменить реальный контакт, имеющий стохастическую природу контактных пятен, фиктивным контактом с регулярным, равномерным распределением круглых пятен касания, которые окружены эквивалентным зазором δ_k , заполненным средой с коэффициентом теплопроводности λ_3 . При этом размеры фиктивного контакта определяются по реальной шероховатости контактирующих поверхностей.

Для определения эквивалентной толщины контактного слоя можно воспользоваться формулой:

$$\delta_k = (R_{z1} + R_{z2}) \cdot [1 - m(R_z)], \quad (7)$$

где R_{z1} и R_{z2} – параметры шероховатости сопрягаемых поверхностей, которые связаны с базисной длиной L_B , по которой они и определяются; m – коэффициент заполнения профиля микронеровностей (0,4...0,6). В результате реализуются модели представленные на рис. 11 и 12.

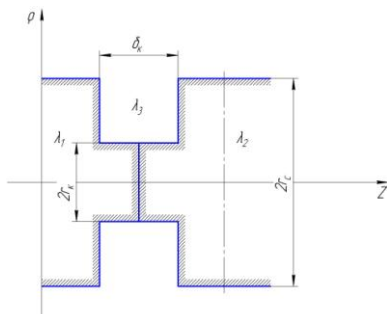


Рис. 11. Модель контакта на основе изолированных цилиндрических элементов.

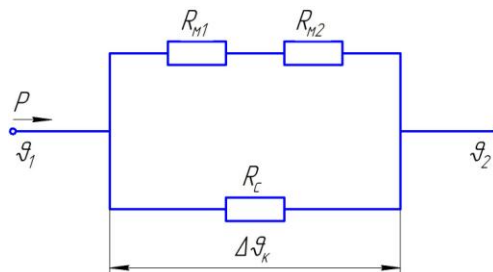


Рис. 12. Эквивалентная тепловая схема замещения контакта на основе изолированных цилиндрических элементов

Примеры температурных полей контактов представлены на рис. 13 и 14.

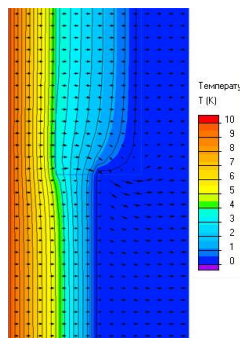


Рис. 13. Температурное поле модели контакта (сопрягаемые детали: микросхема $\lambda_{m1} = 0.33$ Вт/(м·°K); радиатор сплав АМg $\lambda_{m2} = 122$ Вт/(м·°K), окружающая среда кремнийорганическая теплопроводная паста КТП-8 $\lambda_{c3} = 0.9$ Вт/(м·°K), полный тепловой поток $P_{\Sigma} = 0.006095$ Вт, тепловой поток через металлический контакт $P_M = 0.0017638$ Вт)

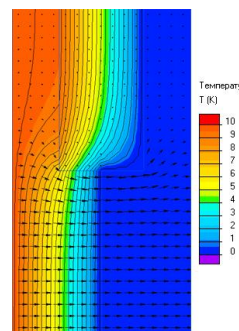


Рис. 14. Температурное поле модели контакта (сопрягаемые детали: микросхема $\lambda_{m1} = 0.33$ Вт/(м·°K); радиатор сплав АМg $\lambda_{m2} = 122$ Вт/(м·°K), окружающая среда воздух $\lambda_{c3} = 0.03$ Вт/(м·°K), полный тепловой поток $P_{\Sigma} = 0.001859$ Вт, тепловой поток через металлический контакт $P_M = 0.001513$ Вт)

Кондуктивный теплообмен в ЭТК имеет большое значение в том случае, когда модули располагаются в негерметизированных отсеках, когда охлаждение поверхности ротора затруднено или сильно ухудшается в процессе функционирования объекта. Внутренний теплообмен в отдельных структурах ЭТК определяется геометрией проводников теплоты и коэффициентами теплопроводности материалов. Поэтому соответствующий выбор материалов и рацио-

нальное размещение тепловыделяющих элементов существенно влияет на среднюю температуру ЭТК. Анализ температурного поля расчетной микроячейки (рис. 15) показывает, что в качестве аналитической модели можно использовать схему замещения (рис. 16).

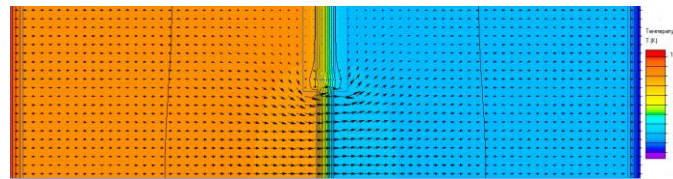


Рис.15. Модель контактного теплообмена шихтованного сердечника на основе цилиндрических элементов с дополнительной теплопроводящей прослойкой (сопрягаемые детали из 20x13 $\lambda_{м1} = \lambda_{м2} = 34$ Вт/(м·°K), между слоями с $\lambda_{и} = 0.2$ Вт/(м·°K), полный тепловой поток $P_{\Sigma} = 0.0020$ Вт, тепловой поток через металлический контакт $P_{м} = 0.00148$ Вт)

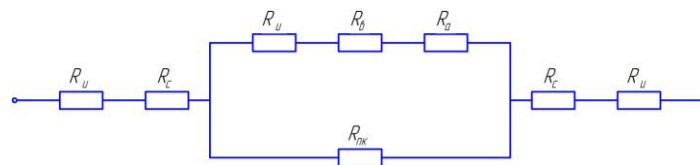


Рис. 16. Эквивалентная тепловая схема замещения фрагмента шихтованного сердечника на основе изолированных цилиндрических элементов ($R_{и}$ – сопротивление изоляции листа, $R_{с}$ – сопротивление стального листа, $R_{сп}$ – термическое сопротивление прослойки из теплопроводящего материала, $R_{пк}$ – термическое сопротивление «пятна» контакта)

Результаты моделирования температурного поля фрагмента шихтованного сердечника представлены на рис. 17 и 18 и сведены в табл. 4.

Рис.17. Модель температурного поля при условии, что внешний тепловой поток направлен вдоль стальных листов (сопрягаемые детали из электротехнической стали 20x13 $\lambda_{м1} = \lambda_{м2} = 34$ Вт/(м·°K), между слоями с $\lambda_{и} = 0.2$ Вт/(м·°K), толщина листа 300 мкм)	Рис. 18. Зависимость эквивалентного коэффициента теплопроводности шихтованного сердечника от коэффициента заполнения сердечника сталью (коэффициент теплопроводности стали 20x13 $\lambda_{ст} = 34$ Вт/(м·°K), межслойная изоляция с теплопроводностью $\lambda_{и} = 0.2$ Вт/(м·°K)

Сравнение термических параметров шихтованного сердечника по продольной (α) и поперечной (β) оси по отношению к внешним тепловым потокам

Теплофизические свойства материалов: $\lambda_{ст} = 34 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$; $\lambda_{ш} = 0.2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)}$	$\lambda_{ш\alpha}$, Вт/(м·°K)	$\lambda_{ш\beta}$, Вт/(м·°K)	$\frac{\lambda_{ш\alpha}}{\lambda_{ш\beta}}$
Расчет	2.69	32.39	0.083
Эксперимент	3.40	33.9	0.100

Современные программные средства позволяют обойтись без понятия эквивалентного коэффициента теплопроводности с учетом контактного теплообмена.

Однако практика показывает, что при использовании упрощенных численных расчетов целесообразно рассматривать шихтованный сердечник как однородное анизотропное тело с эквивалентными коэффициентами теплопроводности $\lambda_{ш\alpha}$ и $\lambda_{ш\beta}$. Такой подход позволяет значительно снизить объем вычислений при переходе от микро- к макроуровню объектов, имеющих гетерогенную структуру.

Результаты моделирования температурного поля гетерогенной среды с внутренним тепловыделением и симметричными граничными условиями первого рода представлены на рис. 19.

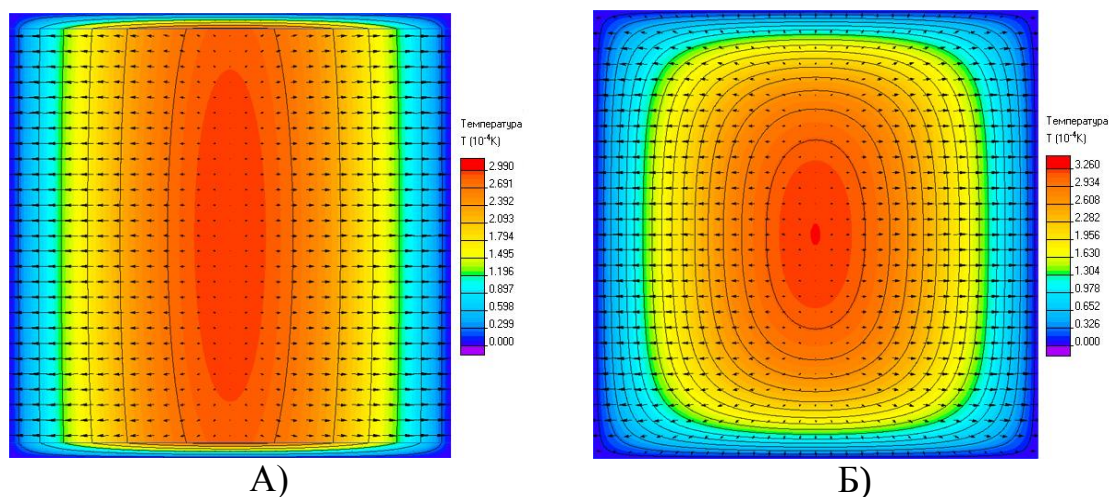


Рис. 19. Результаты моделирования температурного поля фрагмента гетерогенной структуры при симметричных граничных условиях для следующих вариантов:

- А) объект ШС2b 270 10 с реальной структурой;
- Б) эквивалентный анизотропный объект ШС2b 270 10А.

Представленные температурные поля микроячеек наглядно показывают отличие реального объекта (А) от его упрощенной модели (Б). Однако при пе-

переходе от микроячейки к макрообъекту коэффициент неоднородности температурного поля снижается и погрешность расчета температуры уменьшается.

Численная реализация предложенной математической модели связана с решением системы алгебраических уравнений большой размерности. По сути, здесь предлагается применить модифицированный метод тепловых схем. Этот метод аналогичен методу сеток, если рассматривать тепловую схему как сетку с укрупненными ячейками. Поэтому на данном этапе решается задача определения рационального размера расчетных ячеек, от которого зависит размер разреженной матрицы системы. Это возможно сделать при помощи критериев Био (Bi) и Фурье (Fo). Данный подход оказывается достаточно гибким относительно типа решаемых задач. Погрешность приближенного решения определяется величиной критерия Био. Если погрешность оказывается выше допустимой, то ее всегда можно уменьшить, разделяя расчетную область на более мелкие элементы или ячейки. Кроме этого, при рассмотрении многослойной среды можно избежать зависимости размера элементов от соотношения размеров слоев за счет перехода к рассмотрению эквивалентной анизотропной среды. В результате размеры матрицы системы значительно уменьшаются.

В четвертой главе представлен алгоритм численной реализации модели температурных полей объектов ЭТК (рис. 20).

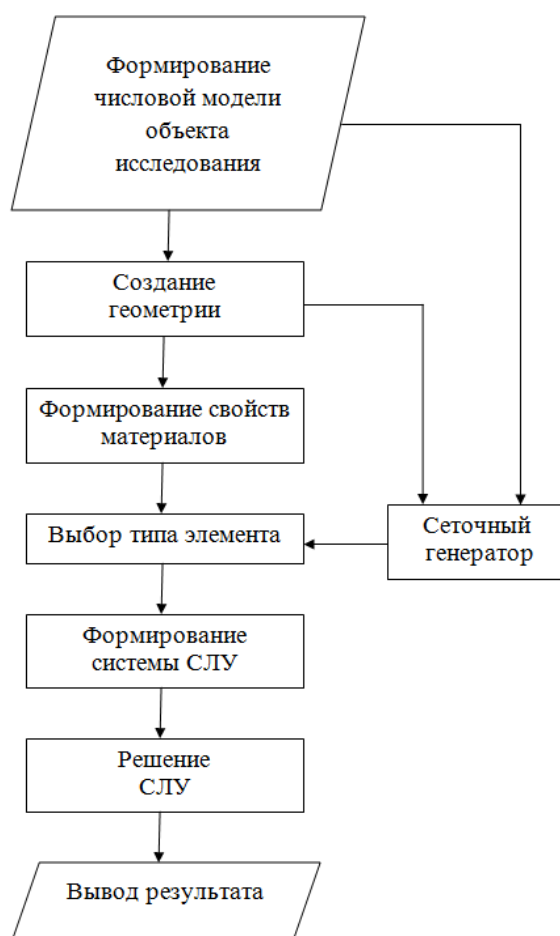


Рис. 20. Алгоритм численной реализации модели температурных полей объектов ЭТК

Разработанный программный комплекс (рис. 21) предназначен для численного анализа взаимного влияния тепловых полей, а также осуществления моделирования температурных полей внутри соответствующих объектов ЭТК.

Блок формирования параметров содержит модуль определения координат моделируемых компонент ЭТК, предназначенный для формирования соответствующих моделей и модуль генерации и определения параметров точек моделируемых компонент ЭТК, который применяется для описания массива расчетных точек в пределах одного объекта моделирования.



Рис. 21. Структура программного комплекса исследования температурных полей ЭТК с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента

Для работы программного комплекса анализа моделей взаимного влияния температурных полей в распределенных ЭТК необходимы следующие исходные данные:

- взаимное расположение компонент (объектов) ЭТК;
- коэффициенты теплопроводности объектов;
- габаритные параметры объектов;
- тепловые потоки на границах объектов;
- температура на границах объектов.

Для разработанного программного комплекса ввод исходных данных разделен на 3 источника.

Первый источник – схема в формате jpeg. На схеме изображаются компоненты распределенной ЭТК и их взаимное расположение. Пропорции отображения системы могут как совпадать с реальными объектами, так и быть непропорциональными реальным объектам. Схема используется для получения информации по всем объектам ЭТК и для дальнейшего отображения карты температур.

Второй источник исходных данных – текстовый файл с параметрами соответствующих объектов. Объекты, считанные программным средством со схемы, описываются с помощью информации из файла с параметрами.

Третий источник исходных данных – текстовый файл с параметрами границ объектов. При отсутствии файла с параметрами границ программный комплекс определяет температуру на каждой границе как равную 0, а также определяет наличие тепловых потоков на каждой границе.

Для возможности формирования программного комплекса на языках высокого уровня разработаны алгоритмы, обеспечивающие пошаговое описание математических моделей.

Для каждого блока разработан собственный алгоритм выполнения операций. Блок работы с исходными данными состоит из 2 модулей и предполагает загрузку настроек из текстового файла и считывание исходного изображения.

Учитывая, что модули блока формирования параметров по своему устройству значительно сложнее модулей загрузки исходных данных, то каждая программная процедура требует отдельного алгоритмического описания.

Сформированный блок добавляется в общий список блоков для проведения численного анализа. При этом после обнаружения нового блока увеличивается счетчик найденных блоков.

Учитывая, что в рамках предложенного алгоритма формируется новый компонент ЭТК (в формате программного комплекса), результатом работы алгоритма является описание нового компонента. При этом отдельным алгоритмом требуется описать этап поиска границ блоков.

Ввиду того, что помимо схемы компоненты ЭТК описываются фактическими размерами, требуется определить их фактические размеры и координаты. Поиск и добавление компонентов ЭТК из схемы позволяет выявить только взаимное положение в пространстве. Также требуется определить тепловые сопротивления на границах объектов.

После этапов поиска блоков и их разбиения требуется создать расчетные точки внутри компонентов ЭТК. При этом на вход алгоритма поступает их список и перечень материалов с их свойствами, которые описывают соответствующие свойства в процессе численного анализа.

Для каждой из созданных точек необходимо определить ближайших соседей. Это требуется для дальнейшего формирования системы уравнений, т.к. в системе уравнений участвует текущая расчетная точка и 4 соседних точки (в двумерном случае). В общем случае в программном комплексе выделяется 2 типа расчетных точек: точка внутри компонента ЭТК и точка на его границе и внешней среды. Граничные точки добавляются для моделирования и анализа процесса теплообмена с внешней средой.

Одним из основных компонентов программного комплекса является модуль математического моделирования и численного анализа на основе генерации и решения системы линейных уравнений. На вход модуля подается список расчетных точек. Затем алгоритм проверяет тип расчетной точки и записывает ее с заданными коэффициентами в специальные матрицы. После заполнения

матриц осуществляется решение системы линейных уравнений, которое определяет температуру в каждой точке исходной схемы.

Разработка программного комплекса осуществлялась в соответствии с принципами процедурного и объектно-ориентированного программирования.

В процессе работы программного комплекса в консоль выводятся процесс и результаты моделирования. Дополнительно программный комплекс формирует визуальную карту температуры в отдельном файле.

Для анализа адекватности результатов моделирования тепловых процессов в работе на основе разработанного программного комплекса в качестве экспертной использована инструментальная система конечно-элементного моделирования «ELCUT». В табл. 5 представлены данные сравнительного численного анализа результатов моделирования.

Таблица 5

Результаты вычислительного эксперимента

	ELCUT	Разработанный программный комплекс
Максимальная температура, К	0,052	0,0516
Тепловой поток на верхней и нижней границах, Вт	3,15	3,18

Как видно из таблицы, отклонения значений данных, полученных с использованием программного комплекса моделирования тепловых процессов, от «эталонных» находятся в пределах 3%.

На рис. 22 представлено изменение температуры в зависимости от коэффициента теплоотдачи поверхности, который зависит от высоты полета объекта.

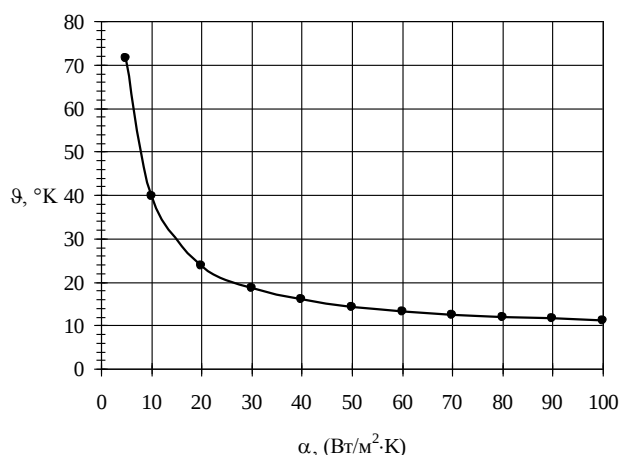


Рис. 22. Изменение температуры в зависимости от коэффициента теплоотдачи поверхности

Максимальное значение α соответствует расположению объекта на поверхности земли и определяется конвективным теплообменом. При подъеме в стратосферу конвективный теплообмен снижается, и охлаждение определяется радиацией (излучением).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1. Осуществлен анализ проблематики моделирования сложных тепловых полей в процессе их взаимодействия в рамках электротехнических комплексов и систем.

2. Разработана модель ребренных охлаждаемых поверхностей типовых объектов ЭТК на основе предложенного метода тепловых схем с учетом свойств взаимных контактных областей отдельных объектов электротехнических комплексов.

3. Разработана модель кусочно-однородной многослойной среды без внутреннего тепловыделения с учетом тепловыделения в активных частях многослойной конструкции, реализующая предложенный метод перехода от кусочно-однородной многослойной среды к эквивалентной сплошной с анизотропными свойствами.

4. Предложена математическая модель анализа тепловых полей распределенных объектов ЭТК, учитывающая динамику изменения параметров окружающей среды.

5. Предложены средства численного анализа моделей тепловых процессов в рамках распределенных объектов ЭТК на базе предложенного метода минимизации числа расчетных элементов на основе критериальных уравнений теплового баланса как для стационарных, так и нестационарных условий теплообмена.

6. На основе разработанных математических моделей и средств численного анализа создан программный комплекс, позволяющий исследовать технические проблемы ЭТК с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Рекомендуется внедрение результатов диссертации в научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованием тепловых полей в рамках распределенных объектов электротехнических комплексов с применением технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

1. Numerical simulation of electromagnetic and thermal processes in high-speed electric machines/ Yu.V.Pisarevsky, V.L. Burkovsky, A.Yu. Pisarevsky, V.B. Fursov, A.I. Borisova and K.Yu.Gusev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. – Vol. 643. – Issue 1. – Номер статьи 012003.

2. Mathematical modeling of thermal processes in small-sized DC electric drives/ Yu.V. Pisarevsky, A.I. Borisova, V.L. Burkovsky, A.Yu. Pisarevsky, V.B.

Fursov, and D.P. Laschenov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. – Vol. 643. – Issue 1. – Номер статьи 012002.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

3. Борисова, А.И. Анализ плотности температурных режимов механотронной аппаратуры в негерметизированных электротехнических комплексах / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – №6. – С. 87-89.

4. Борисова, А.И. Математическая модель процесса взаимного теплообмена в электромеханотронных механизмах/ А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – №2. – С. 66-69.

5. Борисова, А.И. Анализ тепловых процессов в рамках электротехнических комплексов с использованием средств математического моделирования / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. – №6. – С. 46-48.

6. Борисова, А.И. Анализ взаимного теплообмена ребристой поверхности в электротехническом комплексе / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский, Ю.В. Писаревский, В.Б. Фурсов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т.15. – №3. – С. 63-67.

7. Борисова, А.И. Математическое моделирование теплового процесса оболочек распределенных электротехнических комплексов / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т.8. – №3. – С.15-16.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

8. Борисова, А.И. Программный комплекс моделирования температуры поля гетерогенной структуры сердечника в статических режимах: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / А.И. Борисова, К.Ю. Гусев, П.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский. М.: ФИПС, 2020. № 2020614099/69 от 24.12.2020 г.

Статьи и материалы конференций

9. Богушев, В.И. Конструктивно-архитектурные соотношения в БЭПТ вакуумного применения / В.И. Богушев, Л.В. Ганбарова, А.И. Борисова // Мир электромеханотроники. – 2013. – №2. – С.29-34.

10. Борисова, А.И. Анализ теплообмена оболочек механотронных систем в условиях космического применения с элементами математического моделирования /А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Мир электромеханотроники. – 2019. – №8. – С. 29-33.

11. Borisova, A.I., Density analysis of temperature reregimes of vacuum tube instrument in an unpackaged electrotechnical complexes / A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образова-

ние и развитие личности: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 2017. – С. 503-505.

12. Борисова, А.И. Модель процесса теплообмена в негерметичных электромеханотронных исполнительных механизмах/ А.И. Борисова, В.Л. Бурковский// Международная научно-техническая и научно-методическая конференция Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2017): сб. тр. Междунар. науч.-техн. и науч.- метод. конф., Рязань, 2017. – Т. 4. – С. 286-289.

13. Борисова, А.И. Математическая модель энергетических соотношений, определяющих теплофизические процессы в электротехнических комплексах вакуумного исполнения/ А.И. Борисова, В.Л. Бурковский// Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. Воронеж, 2017. – Т.2. – С. 23-25.

14. Борисова, А.И. Тепловые процессы в электромеханотронных комплексах вакуумного исполнения / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский // Современные тенденции в науке, технике, образовании. Смоленск, 2018. – С. 21-23.

15. Агапов, А.А. Некоторые аспекты снижения тепловой напряженности БДПТ в условиях открытого космоса/ А.А. Агапов, В.И. Богушев, А.И. Борисова // Энергия 21 век. – 2018. – №4. – С. 52-54.

16. Борисова, А.И. Моделирование теплообмена оболочек механотронных систем в рамках электротехнического комплекса / А.И. Борисова, В.Л. Бурковский, Ю.В. Писаревский // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Междунар. Науч.-техн. конф. Воронеж, 2019. – С. 256-259.

17. Борисова, А.И. Моделирование и анализ эффективности ребристых поверхностей в системах теплообмена электротехнических комплексов/ А.И. Борисова, В.Л. Бурковский, Ю.В. Писаревский // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Междунар. Науч.-техн. конф. Воронеж, 2019. – С. 344-347.

Подписано в печать 26.01.2021.

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,3. Бумага писчая.

Тираж 80 экз. Заказ № 93.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394026 Воронеж, Московский просп., 14