

На правах рукописи

СИМОНОВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО
ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Вавилов Владимир Платонович,

Официальные оппоненты:

Данилин Николай Семенович,
доктор технических наук, профессор,
Акционерное общество «Российские
космические системы», главный научный
сотрудник

Цветков Николай Александрович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
«Томский государственный архитектурно-
строительный университет», заведующий
кафедрой «Теплоснабжение»

Ведущая организация:

Закрытое акционерное общество «Научно-
исследовательский институт интроскопии МНПО
«СПЕКТР»

Защита диссертации состоится «02» октября 2018 года в 17:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований

Процессы генерации, трансформации и обмена тепловой энергией сопровождают работу всех без исключения технических устройств и в более широком смысле являются неотъемлемой характеристикой человеческой цивилизации. Анализ тепловых процессов и сопровождающих их температурных полей стационарного или динамического характера позволяет оценивать тепловые характеристики взаимодействующих объектов. Этот факт обуславливает растущее применение тепловизионной аппаратуры в технической диагностике и неразрушающем контроле (НК), которое до недавнего времени сдерживалось высокой стоимостью и узкой номенклатурой тепловизоров. В первую очередь, резко возрос интерес к активному тепловому контролю (ТК) композиционных материалов в технически передовых отраслях промышленности. Однако, по нашему мнению, незаслуженно меньшее распространение в настоящее время имеет ТК радиоэлектронных изделий. Находясь под нагрузкой, такие изделия объективно пригодны для осуществления ТК, поскольку они обладают сформировавшимся температурным полем, параметры которого отражают как качество самого изделия, так и эффективность его функционирования. Отечественный ТК в радиоэлектронике имеет давние традиции, начиная с работ Н.С. Данилина, Л.Г. Дубицкого, Ю.А. Концевого, А.Б. Сосновского, О.Д. Бакланова и др. В период перестройки эти традиции были в определенной степени утеряны на фоне произошедшего спада отечественной электроники и микроэлектроники. В настоящее время, с проведением государственной политики импортозамещения, происходит возрождение соответствующих отраслей отечественной промышленности с одновременным ростом интереса к ТК радиоэлектронных устройств (работы Н.С. Данилина, В.А. Захаренко, О.Н. Будаина, А.В. Лукьянова). В качестве отдельной тенденции следует отметить внедрение в радиоэлектронику принципов активного ТК, где опыт российских исследований особенно обширен, см. работы В.П. Вавилова, О.Н. Будаина, Е.В. Абрамовой, Н.Ф. Майниковой. Тем не менее, количество современных отечественных публикаций по применению ТК в радиоэлектронике сравнительно невелико

(краткий обзор зарубежных публикаций приведен в диссертации). В свете вышесказанного проведение научных исследований по пассивному и активному ТК изделий радиоэлектроники (по крайней мере, применительно к отдельным классам устройств), на наш взгляд, является актуальным.

Степень разработанности темы

Как отмечено выше, при ТК радиоэлектроники можно применять как пассивный, так и активный методы. Исторически сложилось так, что практическое применение нашел пассивный ТК узлов и компонентов, находящихся под рабочей или тестовой нагрузкой. В бывшем СССР основополагающие исследования были выполнены Н.С. Данилиным, Л.Г. Дубицким, Ю.А. Концевым и др. В частности, Н.С. Данилиным была продемонстрирована корреляционные зависимости между температурой радиоэлектронных компонентов и их рабочим ресурсом. Следует заметить, что при пассивном подходе к испытаниям радиоэлектронных изделий температурные сигналы, на основе которых принимают решение о качестве, составляют единицы и десятки градусов. В активном ТК материалов и изделий соответствующие сигналы значительно ниже, что представляет объективную трудность при их интерпретации. Кроме того, теплофизический анализ активных режимов осложняется разнообразием геометрических форм, материалов и размеров изделий радиоэлектроники, а известные методы теоретического анализа тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры не применялись в ТК. В настоящих исследованиях использован многолетний опыт научно-производственной лаборатории «Тепловой контроль» Томского политехнического университета в области активного ТК материалов применительно к конкретным классам электронных узлов и изделий, а именно, блокам питания бетатронов и гипертеплопроводящим плоским тепловым трубам.

Цель исследования – на основе теплофизического подхода к тепловому контролю (ТК), заключающегося в анализе переходных тепловых процессов, выполнить теоретические и экспериментальные решения ряда специфических задач теплового неразрушающем контроле узлов и изделий электронной техники.

Задачи исследования

- исследовать возможности использования импульсного метода Паркера для оценки качества гипертеплопроводящих плоских тепловых труб;
- исследовать возможности ТК теплонагруженных узлов и изделий электронной техники в динамических тепловых режимах;
- исследовать предельные характеристики обнаружения локальных источников тепла в интегральных микросхемах в переходных тепловых режимах.

Объектом исследования является активный и пассивный тепловой неразрушающий контроль изделий электронной техники.

Предметом исследования является разработка метода неразрушающих испытаний электронных устройств, основанного на анализе параметров теплового отклика объектов контроля на внешнюю и внутреннюю тепловую стимуляцию.

Научная новизна

- На базе решения трехмерной задачи теплового контроля многослойных тел с внутренними источниками тепла разработан алгоритм и программное обеспечение для оценки глубины залегания и мощности локальных тепловых источников в интегральных микросхемах путем анализа пространственно-временных характеристик нестационарных поверхностных температурных полей (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018615919).

- Разработана методика неразрушающих испытаний качества ГТП, или плоских мини-тепловых труб, используемых в бортовой электронной аппаратуре спутников, которая основана на использовании импульсного метода Паркера. Установлено, что эффективная сквозная теплопроводность ГТП находится в диапазоне от $1,4 \cdot 10^{-5}$ до $4,1 \cdot 10^{-5}$ м²/с, в среднем различаясь в 2 раза для различных экземпляров ГТП вследствие различной массы воды. Теплопроводность в сквозных направлениях находилась для конкретного изделия в диапазоне от $10,3 \cdot 10^{-5}$ до $14,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с, что связано с неравномерным распределением воды в пористом фитиле ГТП.

- Установлено, что моделирование работы ГТП путем размещения на поверхности локальных источников тепла и ИК термографического анализа температуры позволяет оценить эффективность и скорость теплопередачи в ГТП, а также идентифицировать зоны неравномерного размещения воды в фитиле, включая блокирование пор, и, следовательно, оптимизировать размещение электронных компонент на поверхности конкретных ГТП.

- Разработана методика приближенной оценки параметров переходных тепловых процессов в телах простой геометрической формы, основанная на использовании датчиков теплового потока. Получены решения для малых ($Fo < 0,02$) и больших ($Fo > 0,1$) величин безразмерного времени (числа Фурье Fo), обеспечивающие погрешность расчетов не более 16% по сравнению с точными аналитическими решениями (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012612616).

Практическая значимость работы заключается в следующем.

Выполнены исследования по тепловому контролю гипертеплопроводящих панелей (ГТП), или плоских мини-тепловых труб, имеющие практическое значение при экспрессном входном/выходном контроле в условиях производства ГТП (справка об использовании результатов диссертационной работы выдана АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева)). Предложена методика тепловизионного контроля блоков радиоэлектронной аппаратуры в динамических режимах.

Основные положения, выносимые на защиту

- На основе моделирования источников тепла в изделиях микроэлектроники возможно создание методики приближенной оценки мощности скрытых источников путем анализа пространственно-временных характеристик нестационарных поверхностных температурных полей.

- Структурная однородность гипертеплопроводящих панелей (ГТП), или мини-тепловых труб, может быть охарактеризована эффективной температуропроводностью, которую предлагается определять по методу Паркера. Общая масса воды влияет на среднюю сквозную температуропроводность ГТП, а

распределение воды в ГТП может быть оценено по распределениям сквозной и поперечной температуропроводности.

- Качество функционирования ГТП может быть оценено путем размещения на их поверхности локальных источников тепла и анализа однородности динамических тепловых полей ГТП.

- Громоздкие решения теории теплопроводности, связанные с нахождением корней трансцендентных уравнений и наличием бесконечных рядов при анализе переходных тепловых процессов могут быть заменены простыми практическими выражениями для предельных случаев больших и малых величин числа Фурье.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационных исследований использованы в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (см. соответствующую справку в приложении к диссертации).

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается использованием компьютерной тепловизионной аппаратуры, позволяющей измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более $\pm 1\%$ или $\pm 1^\circ\text{C}$ и дифференциальные температуры с чувствительностью до $0,01^\circ\text{C}$. Использованная программа расчета трехмерных температурных сигналов основана на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности, валидация которого осуществлена согласно предельным аналитическим решениям классической теплофизики. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общезначимым принципам и данным, полученным другими авторами в смежных областях исследований.

Апробация работы

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, Россия, 04-06 октября 2011 г.; XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона», г. Новосибирск, Россия, 24-26

апреля 2013 г.; All-Russian scientific conference with international participation «Thermophysical Basis of Energy Technologies» (TBET-2016), Russia, Tomsk, October 26-28, 2016.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке методики применения тепловизоров для исследования переходных тепловых режимов в ИМС и теплонагруженных блоках бетатронов;
- проведении экспериментальных исследований и интерпретации данных при испытаниях ГПТТ;
- написании статей по результатам выполненных исследований.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами

Диссертационные исследования связаны с выполнением гранта РНФ № №17-19-01047 «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов», а также контракта №5-285/14 от 18.11.2014 г. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)».

Публикации

Основные результаты исследований отражены в 14 публикациях, в том числе 3 статьи в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science, 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационных исследований

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 122 работы, одного приложения, содержит 103 страницы текста, 25 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор пассивных и активных методов теплового контроля (ТК) применительно к объектам электронной техники. Термин «тепловой контроль» появился еще в 1935 г., когда J. Nichols предложил контролировать качество горячего проката путем анализа температуры на поверхности металлических заготовок, что позволило выявлять краевые расслоения. В СССР основателями активного ТК выступили Н.А. Бекешко, Ю.А. Попов, В.П. Вавилов, А.Е. Карпельсон, А.Б. Упадышев, Ю.В. Гавинский и др., причем акцент в исследованиях этих авторов был сделан на испытания ответственных материалов и изделий военно-промышленного комплекса. В области пассивной технической диагностики пуско-наладочное предприятие «ОРГРЭС» и НИИ строительной физики успешно внедряли зарубежный опыт по контролю электрооборудования и строительных сооружений соответственно. Российские исследования в области теории ТК были передовыми для своего времени.

Температура элементов радиоэлектроники является одним из ключевых факторов, определяющих их долговечность в рабочем режиме. Для оценки качества исследуемого объекта, контроля скрытых дефектов в радиоэлектронной аппаратуре, а также нарушений сплошности в материалах, могут использоваться как пассивный, так и активный методы ТК.

Вторая глава описывает применение методов теплофизического моделирования для исследования тепловых режимов изделий микроэлектроники, причем, в отличие от известных подходов, использовались численные решения задач нестационарной теплопроводности в твердых телах, что позволило проанализировать дефекты произвольных размеров. Практическая постановка данной задачи исследований была связана с необходимостью обнаружения скрытых в изделиях микроэлектроники локальных источников тепла микроваттной

мощности. В качестве примера рассматривалась многослойная интегральная микросхема (ИМС). Тепловая модель приведена на рисунке 1,а и представляет собой многослойный параллелепипед из нитрида кремния с внутренними источниками тепловыделения, размещенный на кремниевой подложке.

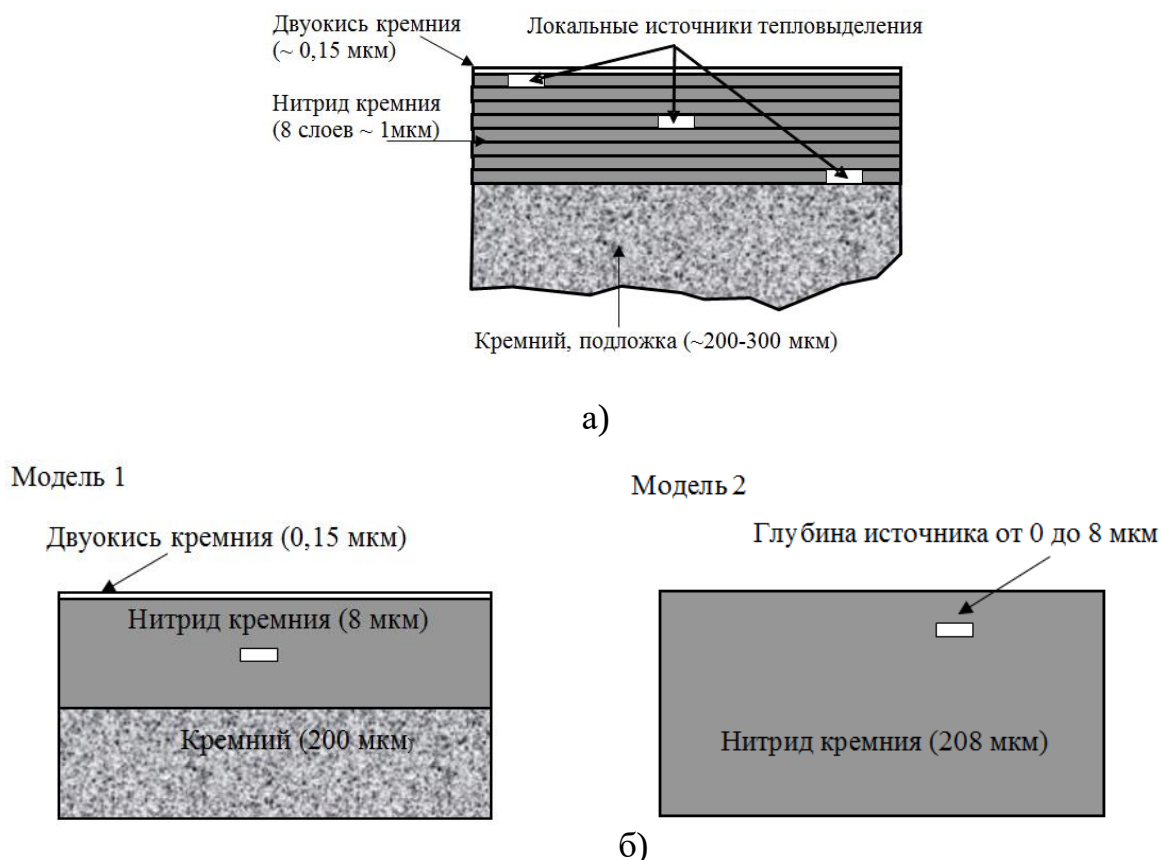


Рисунок 1 – Тепловая модель ИМС: а – тепловая модель ИМС; б – упрощенная тепловая модель ИМС

В диссертационной работе использованы малоизвестные аналитические формулы решения двух задач теплопроводности, имеющих прямое решение к исследуемой проблеме: точечный и дискообразный источник постоянного тепловыделения внутри адиабатического полупространства (Модель 2 на рисунке 1,б). Важность полученных решений состоит в том, что они позволяют:

- 1) проверить точность численных решения, полученных с помощью программы ThermoSource;
- 2) получить оценки предельно-обнаруживаемых мощностей и глубин залегания внутренних источников в упрощенных моделях микросхемах.

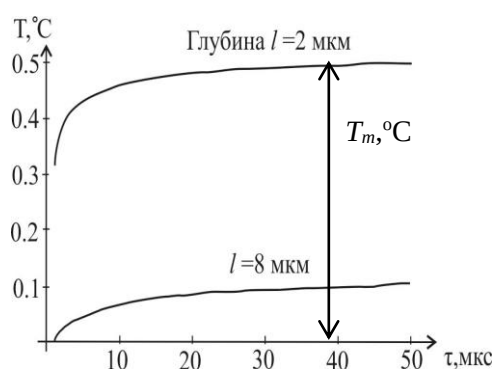
Проверка точности численного решения была выполнена на предельных моделях (источник малой толщины в пластине, толщина которой велика по сравнению с глубиной залегания источника) и показала приемлемую величину $<10\%$ в сопоставимых случаях.

Изменение температуры на поверхности слоя из нитрида кремния при действии точечного источника тепла показано на рисунке 2,а. Для того же материала зависимость максимального температурного сигнала от глубины залегания и мощности источника в нитриде кремния дается соотношением:

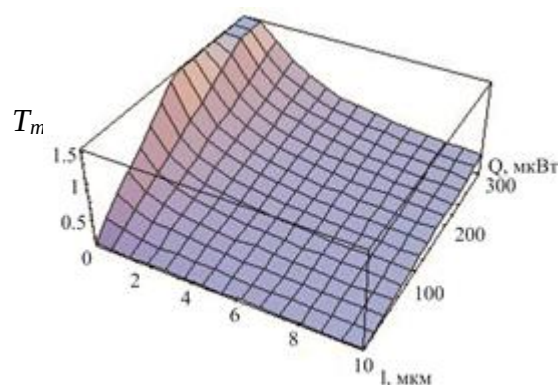
$$T_m [^{\circ}\text{C}] = 0,0106 Q/l;$$

где l – глубина залегания, мкм; T_m – температура поверхности ИМС, $^{\circ}\text{C}$; Q – мощность источника, мкВт.

Общий вид этой зависимости показан на рисунке 2,б.



а)



б)

Рисунок 2 – Температурные сигналы, генерируемые внутренними точечными источниками тепловыделения в ИМС на базе нитрида кремния: а – $\Delta T(\tau)$ для двух значений l и мощности 100 мкВт; б – по аналитическим формулам

Анализируя полученные кривые, можно сделать вывод, что при включении источников на микрометровых глубинах стационарное значение достигается через микросекундные времена.

Второе важное заключение связано с предыдущим тезисом. Из теории ТК известно, что оценка глубины дефектов по температуре требует анализа характерных времен нарастания температуры и определяется также температуропроводностью материала. В нашем случае это, по-видимому, затруднительно из-за невозможности записать динамический процесс с требуемым

временным разрешением. Тем не менее, в разработанной программе ThermoSource реализована процедура определения мощности и глубины залегания источников на базе предложенных формул теории теплопроводности.

Решение сводится к расчету нестационарного температурного поля над источниками произвольной (прямоугольной) конфигурации, расположенными в слоях 6-слойной пластины. Показано, что для точечного, дискообразного и прямоугольного источника с объемом до $4,5 \text{ мкм}^3$ расхождение в значениях температуры не превышает 15% (максимальная температура над источником во всех случаях составляла около $0,1^\circ\text{C}$), что допустимо в теплофизических практических расчетах; следовательно, такой источник может рассматриваться как точечный.

Обработка полученных ИК изображений, в основном, базируется на анализе динамики температурных процессов (здесь основной проблемой является, как отмечено выше, слишком высокая скорость изменения температуры над источниками, расположенными на микрометровых глубинах). Разработанное программное обеспечение ThermoFit Pro, позволяет обрабатывать ИК изображения, используя следующие алгоритмы:

- стандартные процедуры обработки отдельных ИК изображений (фильтрация, вычитание, усреднение и т.д.);
- специализированные процедуры обработки динамических последовательностей ИК изображений (нормализация, построение максиграмм и таймограмм, Фурье анализ, полиномиальная аппроксимация, анализ главных компонент, анализ производных, дефектометрия скрытых источников и определение теплофизических характеристик материалов); данные процедуры основаны на многолетнем опыте лаборатории ТК Томского политехнического университета в области обработки изображений.

Проведено сравнение вышеописанных алгоритмов обработки, причем критерием сравнения является отношение сигнал/шум. Для анализа выбрана расчетная последовательность ИК термограмма с наложенными реальными

шумами, обусловленными структурой конкретной микросхемы. Внутри микросхемы размещены три локальных источника тепловыделения.

Примеры Фурье-обработки последовательности ИК термограмм на поверхности интегральной микросхемы показаны на рисунке 3. Известно, что фазограммы менее чувствительны к шумам и, следовательно, улучшают «видность» скрытых источников тепла.

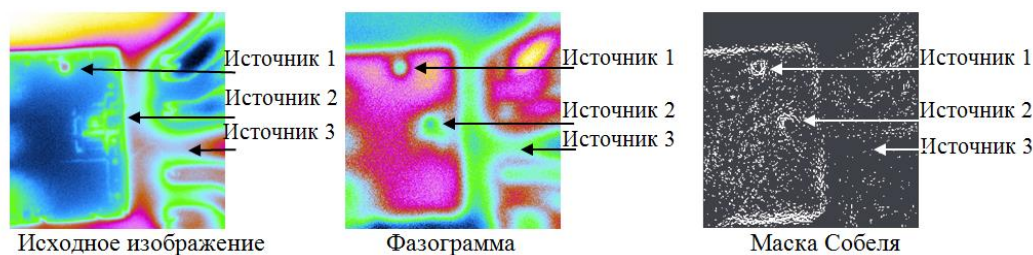


Рисунок 3 – Применяя преобразование Фурье к последовательности ИК термограмм на поверхности интегральной микросхемы

Одним из методов обработки ИК изображений, впервые использованным в Томском политехническом университете для решения задач ТК, является анализ главных компонент. Примеры синтезированных изображений показаны на рисунке 4. Изображения компонент с бóльшим номером содержат температурные аномалии с меньшей амплитудой, поэтому приемлемое обнаружение всех трех источников обеспечивает 4-я компонента (рисунок 4, справа).

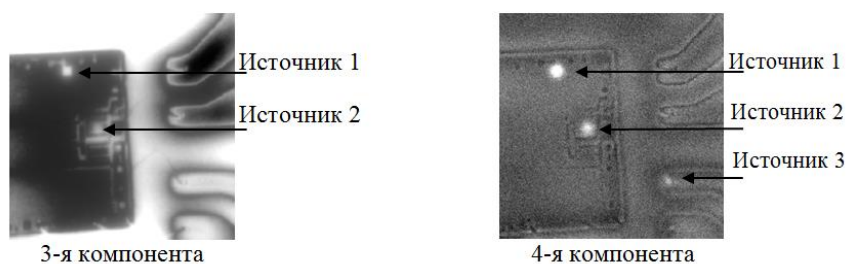


Рисунок 4 – Изображения главных компонент последовательности в сценарии Microprocessor.sce при использовании метода анализа главных компонент

Основным недостатком данного метода является его слабая связь с физикой процесса и трудность прогнозирования того, в какой главной компоненте дефекты данного типа проявятся оптимальным образом.

Третья глава посвящена описанию упрощенного аналитического подхода к оценке переходных тепловых режимов элементов радиоэлектроники при различных условиях теплообмена.

Несмотря на тот факт, что аналитические решения нестационарных задач теплопроводности хорошо разработаны, например, в работах Carslaw H.S. и Jaeger T.S. за рубежом и А.В. Лыкова в бывшем СССР, большинство из них весьма громоздки, поскольку включают бесконечные ряды и требуют нахождения корней трансцендентных уравнений. Однако, для нужд ТК зачастую достаточны приближенные оценки, которые позволяют оценить ожидаемые температурные сигналы и оптимальные времена их регистрации. На примере тепловых режимов блоков питания малогабаритных бетатронов на энергию 3–9 МэВ, разработанных в Томском политехническом университете, были получены приближенные методы оценки температурных полей электронных компонент при различных величинах числа Фурье (безразмерного времени процесса).

Главной целью разработки таких методов является экспресс-анализ теплового состояния энергетического оборудования с приемлемой погрешностью расчета, а также выполнение практических вычислений.

Рассматривается классическая постановка задачи нестационарного теплообмена для неограниченной пластины (в автореферате не приводится).

Для малых моментов времени получено решение в безразмерной форме

$$\theta(X, Fo) = 1 - \exp[-((1 - X) / \sqrt{Fo})], \quad (1)$$

где $X = x / R$ – безразмерная координата, $Fo = a\tau / R^2$ – число Фурье.

Погрешность расчетов для неограниченной пластины с использованием точного решения данной задачи (см. известную монографию Лыкова А.В.) не более 16%.

Для случая больших чисел Фурье ($Fo > 0,1$) использовали метод Кошлякова-Гринберга (метод решения предложен В.С. Логиновым, ТПУ), решение получено в виде:

$$\theta(X, Fo) = \frac{\mu^2}{2} (1 - X^2) \exp(-\mu^2 Fo). \quad (2)$$

где μ - первый корень классического трансцендентного уравнения. Максимальная погрешность расчета в этом случае не превышает 9% при $Fo \geq 2$. Практическая реализация предложенных методов не требует разработки пакета прикладных программ для современных средств вычислительной техники.

В Главе 4 описаны результаты применения ИК термографии для анализа нестационарного теплового режима блока питания малогабаритного портативного бетатрона на энергию 7,5 МэВ. Использован тепловизор NEC Avio TH-9100, работающий в диапазоне длин волн 7 – 13 мкм и обеспечивающий температурную чувствительность до 30 мК при формате термограмм 320×240. В зоне контроля блок был покрыт полиэтиленовой пленкой толщиной 60 мкм с целью имитировать конвекцию в закрытом блоке питания. Присутствие пленки искажало температурные величины не более чем на 1,5% благодаря высокой прозрачности полиэтилена в ИК диапазоне.

Примеры обработки записанных последовательностей ИК термограмм с помощью программы ThermoFit Pro (ТПУ) показаны на рисунке 5.

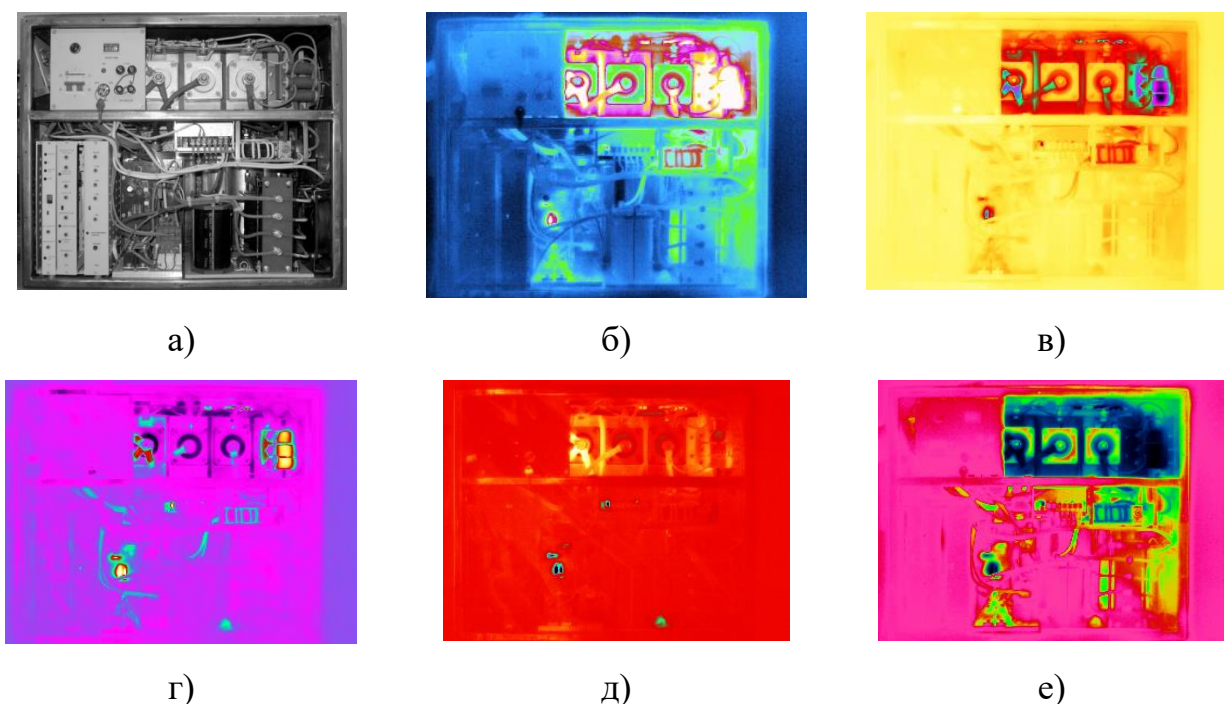


Рисунок 5 – Результаты тепловизионной диагностики блока питания после включения бетатрона МИБ-7,5: а – фотография блока питания; б – ИК термограмма через 10 минут после включения бетатрона; в – после применения метода анализа главных компонент (МАГК) – 1-я компонента; г - МАГК, 2-я компонента; д – МАГК, 32-я компонента; е – коррелограмма

Показано, что эффективным алгоритмом обработки является метод анализа главных компонент, позволяющий выделять в динамических тепловых изображениях текстуры различного размера и амплитуды (см. рисунки 5 в – д).

Глава 5 посвящена активному ТК гипертеплопроводящих панелей (ГТП), используемых в бортовых электронных устройствах, и обеспечивающих оптимальные температурные режимы электронной аппаратуры в условиях открытого космоса. ГТП представляют собой плоские мини-тепловые трубы, в которых отвод тепла от зоны нагрева, или зоны размещения радиоэлектронных элементов, осуществляется теплоносителем (водяным паром, аммиаком), проходящим по паровым каналам за счет перепада давления. Сконденсированный теплоноситель поступает назад в зону нагрева по фитилю (пористой структуре) за счет капиллярных сил. Массу жидкости внутри ГТП в рабочем диапазоне температур выбирают таким образом, чтобы ГТП содержала как пар, так и жидкость. При этом источники тепловыделения размещают на поверхности ГТП произвольным образом (рисунок 6).

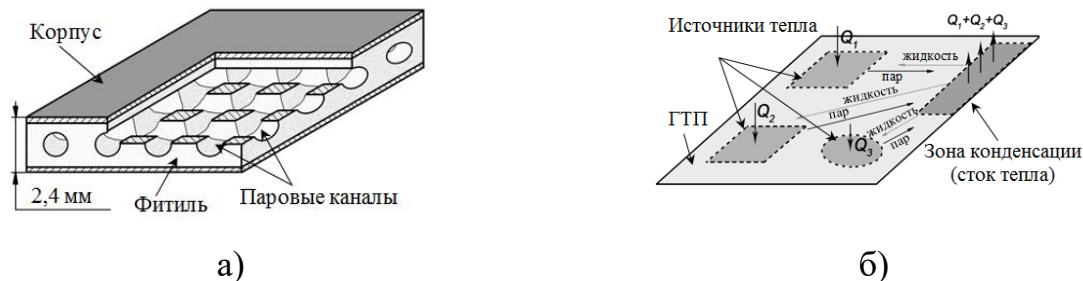


Рисунок 6 – Схема ГТП (а) и принцип ее действия (б)

Качество ГТП, являющихся примером мелкосерийной дорогостоящей продукции единичных отечественных производителей, подлежит проверке как на выходе из предприятия-изготовителя ГТП, так и на предприятии-потребителе космической радиоэлектронной аппаратуры. Опыт применения этих изделий показал, что имеются проблемы, связанные с качеством работы ГТП, что в ряде случаев приводит к отклонению реальных характеристик от паспортных. Существующие методы контроля качества тепловых труб являются либо разрушающими, что в принципе неприемлемо для этих сравнительно дорогостоящих устройств, либо неразрушающими, но интегральными.

В диссертации выполнен анализ «тонкой» структуры ГТП и получена двумерная картина процесса теплопередачи внутри ГТП методом активной ИК термографии. Новизна исследования обусловлена переносом экспрессного метода определения температуропроводности (метода Паркера) на новый класс многослойных структур, которыми являются ГТП, а также анализом теплопередачи в ГТП с высоким пространственным и временным разрешением.

Исследовали две отечественных ГТП, являющихся совместной разработкой АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева», Института вычислительного моделирования СО РАН и Уральского электрохимического комбината. Герметичные изделия из меди общей толщиной 2,4 мм обеспечивают эффективную теплопроводность до 14000 Вт/(м·°C) при 25 °C и 25000 Вт/(м·°C) при 60 °C. Внешний вид ГТП показан на рисунке 7,а. Наличие паровых каналов отчетливо видно на негативной рентгенограмме рисунке 7,б, полученной методом цифровой рентгенографии (более светлые зоны соответствуют бóльшему поглощению рентгеновского излучения). Использован рентгеновский аппарат РАП – 220 с фокусным пятном 2×2 мм и GaAs - панель.

Выполнено три типа экспериментов с целью определения динамических тепловых характеристик ГТП.

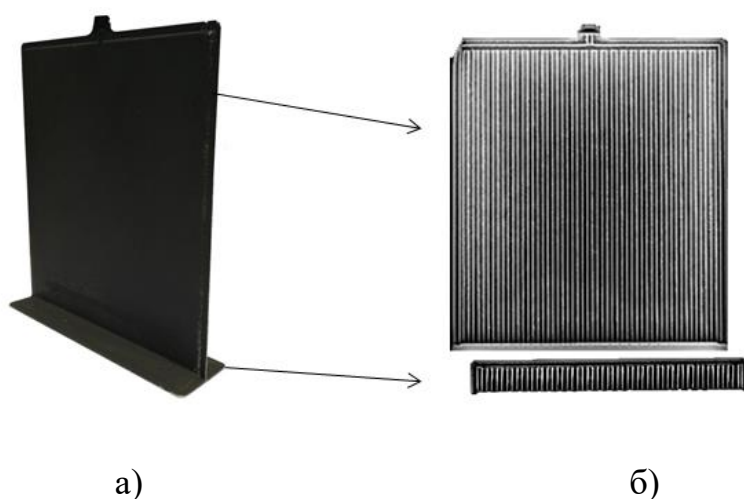


Рисунок 7 – Гипертеплопроводящие панели: фотография (а) и рентгеновский снимок (б)

Предложено рассматривать ГТП как анизотропную структуру, характеризующуюся тремя компонентами температуропроводности (см. схему на рисунке 8): a_x , a_y , a_z . Фактически определяли две «поперечные» и одну «сквозную» компоненты температуропроводности. Для определения «сквозной» температуропроводности использовали метод Паркера.

Два экземпляра ГТП нагревали одиночной импульсной ксеноновой лампой, обеспечивающей энергию оптического импульса 1,6 кДж в течение 5 мс. Температуру задней поверхности ГТП регистрировали с помощью ИК тепловизора высокого уровня FLIR SC 7700M. Перед ГТП размещали полосовую маску из алюминия толщиной 0,5 мм, чтобы обеспечить полосовой регулярный нагрев, что необходимо для определения «поперечных» компонент температуропроводности.

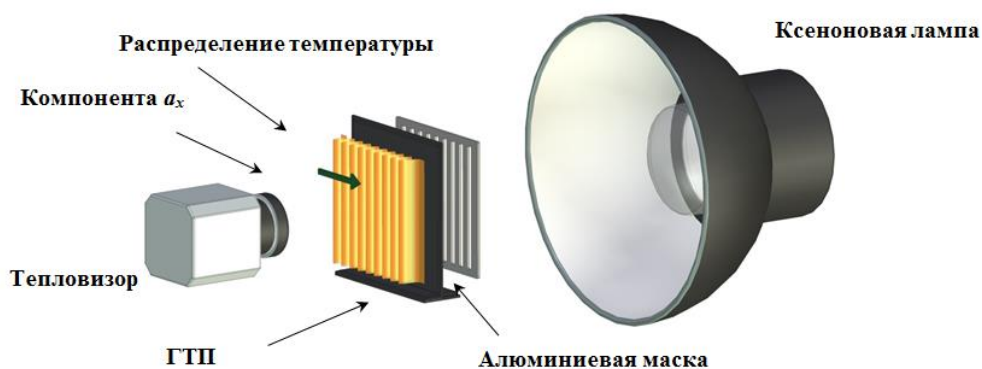


Рисунок 8 – Определение трех компонент температуропроводности ГТП

Следуя классическому методу Паркера, вначале определяли максимальную температуру изделия T_m , затем определяли время, соответствующее половине максимума (half-rise time) $\tau_{0.5}$, после чего определяли в каждом пикселе термограммы величину температуропроводности по формуле: $a_z = 0.139L^2 / \tau_{0.5}$, где L – толщина ГТП.

Пример кривой Паркера приведен на рисунке 9. Рисунок 10 показывает ИК термограммы двух ГТП и синтезированные на их основе карты температуропроводности.

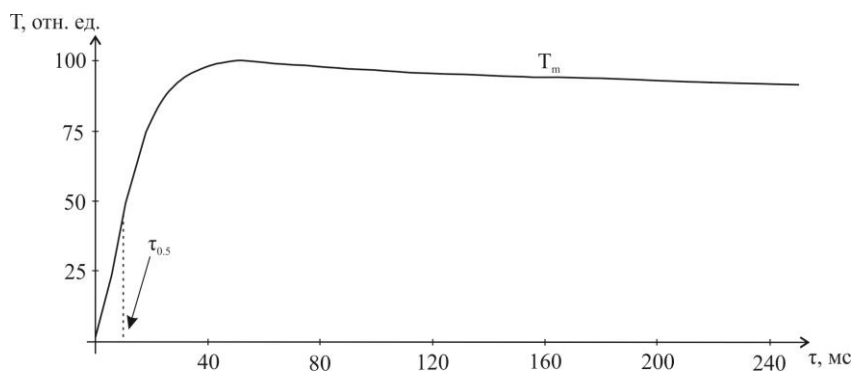


Рисунок 9 – Определение «сквозной» теплопроводности ГТП: экспериментальная кривая Паркера (T как функция τ)

Для получения поперечных компонент теплопроводности создавали модулированный по пространству тепловой поток (в виде синусоидальной функции). Для расшифровки температурной информации применили пространственное преобразование Фурье.

Для получения поперечных компонент теплопроводности создавали модулированный по пространству тепловой поток (в виде синусоидальной функции). Для расшифровки температурной информации применили пространственное преобразование Фурье.

Математическая модель данной процедуры имеет следующий вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_z(z) \frac{\partial T}{\partial z}]$$

$$T(x, y, z, \tau = 0) = Q(x, y) Q_z(z) / \rho C \quad (3)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = -h_0 T(x, y, z=0, \tau)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = h_L T(x, y, z=L, \tau),$$

здесь: ρ , C – плотность и удельная теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности; h – коэффициент теплообмена со средой.

Используя преобразования Фурье-Лапласа и применяя классический метод Паркера к «Фурье-температуре» при нулевых пространственных частотах $\tilde{\tilde{T}}(0, 0, \tau)$, получено следующее базовое выражение

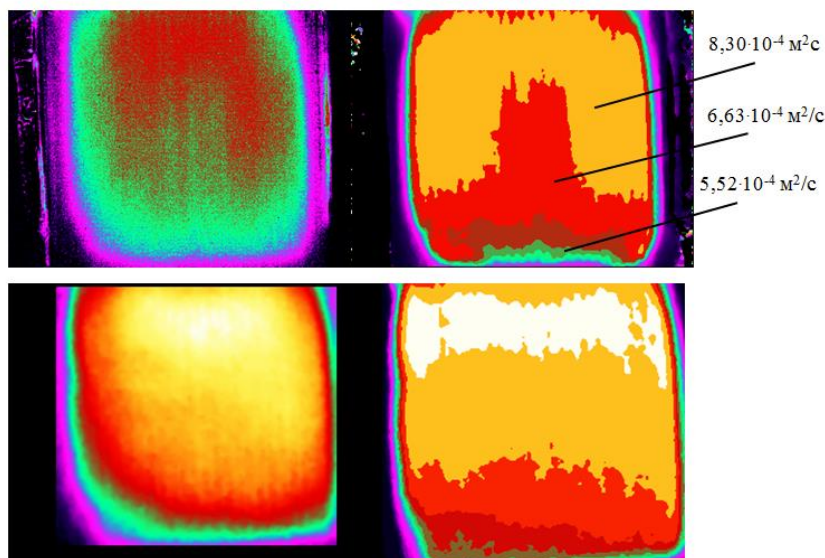


Рисунок 10 – Определение «сквозной» температуропроводности ГТП: ИК термограммы двух образцов (слева) и соответствующие карты температуропроводности $IR a_z$ (справа)

$$\tilde{\tilde{T}}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) / \tilde{\tilde{T}}(0, 0, z, \tau) = \tilde{\tilde{Q}}(\omega_x, \omega_y) / \tilde{\tilde{Q}}(0, 0) \exp(-a_x \omega_x^2 \tau - a_y \omega_y^2 \tau), \quad (4)$$

где ω – пространственные частоты по соответствующим координатам, двойной знак «тильда» означает пространственное преобразование Фурье. Анализ этого выражения был выполнен в кандидатской диссертации А.О. Чулкова (ТПУ).

Базовое выражение (4) справедливо для любой z -координаты, включая переднюю и заднюю поверхности пластины. Более того, оно также справедливо и при наличии тепловых потерь на любой поверхности пластины, а также, если имеет место частичное поглощение энергии нагрева в материале пластины, и тепловой поток нагрева описывается функцией $Q(x, y)Q_z(z)$.

Экспериментальные результаты представлены на рисунке 11. Ширину прорезей в маске оптимизировали, достигая максимальную избыточную температуру на задней поверхности ГТП на уровне 5°C , что соответствовало максимальному отношению сигнал/шум. Вертикальное температурное распределение на рисунке 11,а и соответствующий профиль на рисунке 11,б были получены при вертикальном расположении, как прорезей маски, так и каналов ГТП; следовательно, в этом случае определяли горизонтальную, то есть перпендикулярную каналам ГТП, компоненту «поперечной» температуропроводности a_x . Следуя вышеприведенному алгоритму, величину a_x

рассчитали как угол наклона профиля на рисунке 11, в на уровне $10,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Соответствующая величина a_y равнялась $14,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

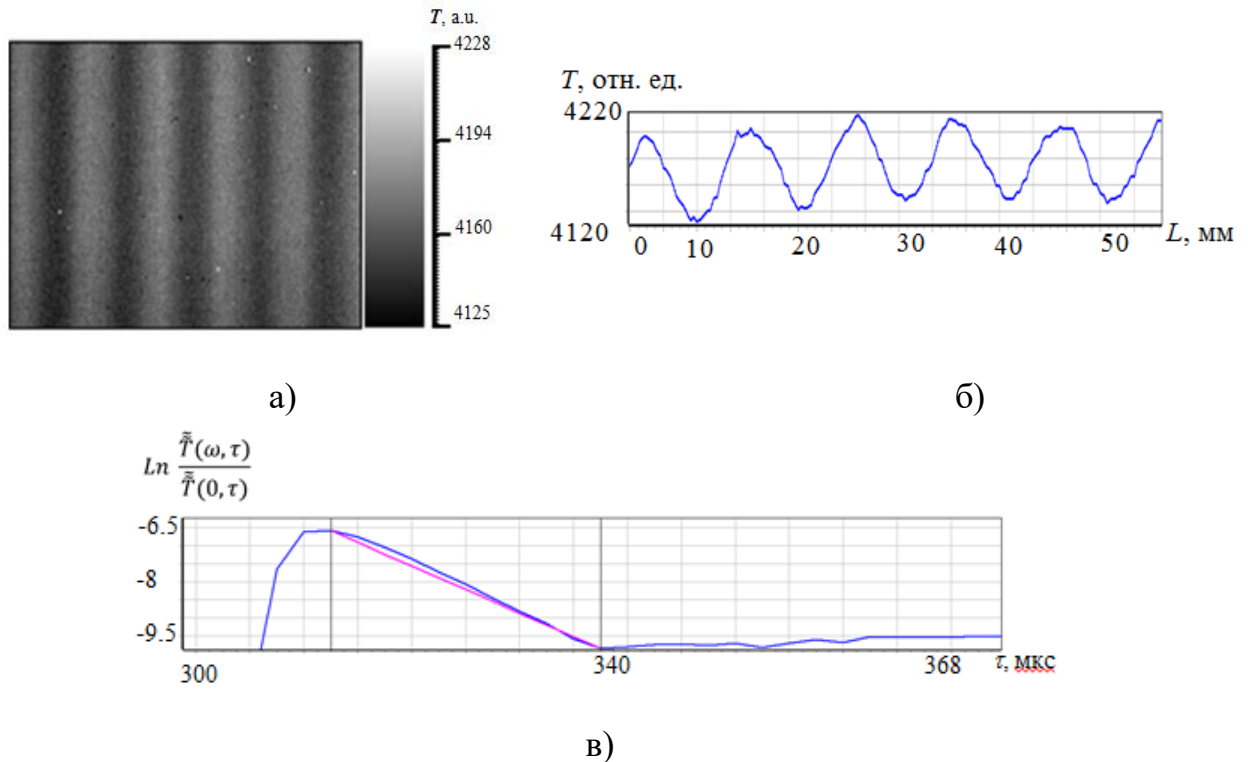


Рисунок 11 – Определение «поперечной» компоненты температуропроводности a_x : а – ИК термограмма (шкала в относительных единицах); б – пространственный температурный профиль; в – изменение «Фурье-температуры» во времени

Другой вид тепловой стимуляции ГТП заключался в размещении локального источника тепла на поверхности ГТП. Цилиндрический контейнер диаметром 20 мм из стали, содержащий воду температурой 85°C , был размещен на поверхность ГТП (рисунок 12, точка 1 на противоположной поверхности ГТП соответствует центру контейнера). Поскольку температуру ГТП записывали в течение 1 секунды с частотой 10 Гц, температура воды за это время практически не менялась. Рисунок 12а показывает профили температуры в 4-х точках (точка 4 расположена на расстоянии 70 мм от точки 1). ИК термограммы, представленные на рисунках 12 б-г, иллюстрируют определенную асимметрию температурного распределения, которая развивается в течение 10 с.

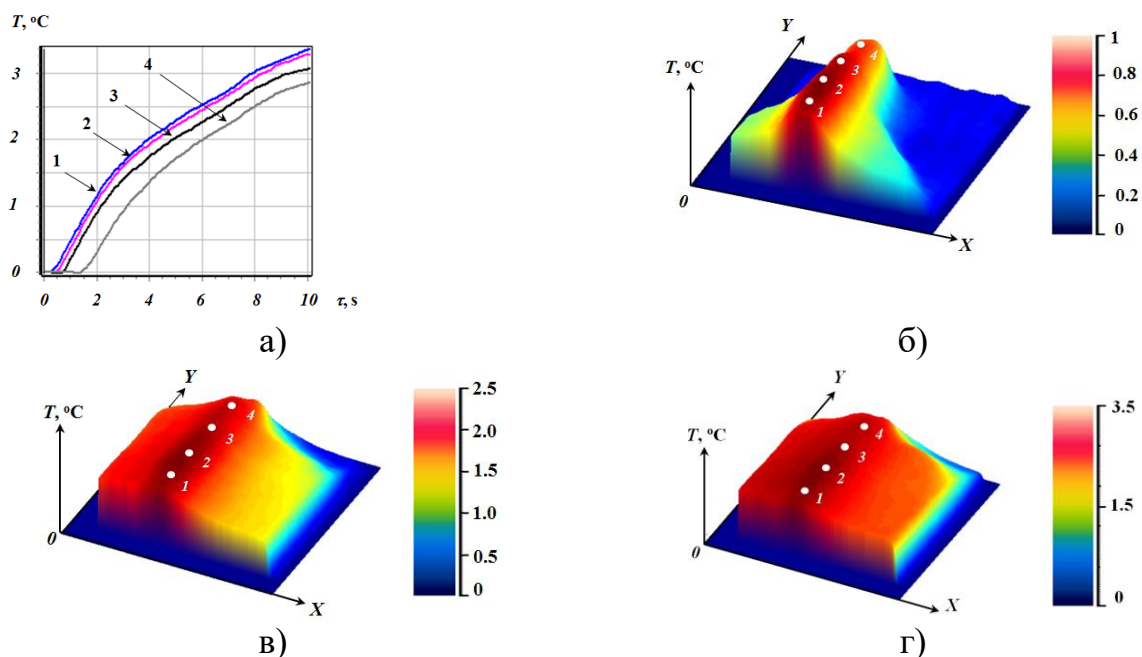


Рисунок 12 – Нестационарное поле температуры на поверхности ГТП с локальным источником тепла (температура источника 85°C , диаметр источника 20 мм, точка 1 соответствует центру источника тепла): а – эволюция температуры в 4-х точках; б – ИК термограмма через 1 с после включения источника; в – 5 с; г – 10 с.

Основные научные результаты и выводы

- Исторически ТК изделий мощной электроники и микроэлектроники был одной из первых сфер применения данного метода с целью выявления скрытых дефектов и прогнозирования их качества. Ведущие мировые производители, а также ряд отечественных организаций (в бывшем СССР), разработали методики пассивного ТК, в которых объекты контроля стимулировали рабочей или тестовой электрической нагрузкой. В то же время методики активного ТК, разработанные для испытаний конструкционных материалов, недостаточно используются при контроле изделий радиоэлектроники.

- Разработаны алгоритм и программное обеспечение ThermoSource, предназначенное для расчета трехмерных температурных полей в слоистых изделиях, состоящих из разнородных материалов, и имеющих источники внутреннего тепловыделения в различных слоях; в математическом плане это соответствует решению прямой задачи диагностики.

- Разработаны дефектометрический алгоритм и программное обеспечение ThermoFit Pro, предназначенное для обработки экспериментальных

последовательностей ИК изображений, полученных в динамических режимах включения внутренних источников в интегральных схемах; в математическом плане это соответствует решению обратной задачи диагностики. Получены простые формулы, позволяющие получать приближенные оценки мощности и глубины залегания локальных источников тепловыделения в интегральных микросхемах.

- Для анализа переходных тепловых процессов в электронных изделиях, аппроксимируемых телами простой геометрической формы – пластиной, цилиндром, сферой, получены решения для малых ($Fo < 0,02$) и больших ($Fo > 0,1$) величин безразмерного времени (числа Фурье Fo), обеспечивающие погрешность расчетов не более 16% по сравнению с точными аналитическими решениями.

- Экспериментально продемонстрирована эффективность специализированной обработки термограмм на примере контроля переходного теплового режима блока питания портативного бетатрона 7,5 МэВ, в особенности, метода анализа главных компонент, позволяющего выделять в отдельных главных компонентах тепловые текстуры различного типа.

- Алгоритмы активного ТК применены для неразрушающего контроля гипертеплопроводящих тепловых панелей (ГТП). Карты температуропроводности, получаемые с использованием метода Паркера, отражают особенности внутренней структуры ГТП, в частности, распределения воды и плотности фитиля. Тепловую стимуляцию ГТП следует производить с помощью ксеноновых импульсных ламп, обеспечивающих оптическую энергию на уровне нескольких килоджоулей в импульсе длительностью около 5 мс. Температурные поля ГТП следует регистрировать с помощью ИК тепловизоров высокого уровня, которые обеспечивают частоту записи более 100 Гц.

- Эффективная «сквозная» температуропроводность протестированных образцов ГТП находилась в диапазоне от $1,4 \cdot 10^{-5}$ до $4,1 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Температуропроводность двух исследованных ГТП различалась приблизительно в два раза, что может быть объяснено различным содержанием воды в фитиле. Компоненты «поперечной» температуропроводности в выбранном для испытаний экземпляре ГТП составили: $a_x = 10,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с и $a_y = 14,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Неоднородность

распределения «поперечной» температуропроводности достигала 20-50%, что связано с локальными структурными аномалиями, а именно, воды в фитиле ГТП.

- Выполнено моделирование рабочего режима ГТП путем размещения на их поверхности локального источника тепла, что позволило: 1) оценить эффективность и скорость теплоотвода через ГТТ; 2) идентифицировать зоны неравномерного распределения воды в фитиле ГТТ, включая блокировку пор и, таким образом, оптимизировать размещение электронных компонент на поверхности конкретных ГТТ в рабочем режиме.

- Основные результаты исследований отражены в 14 публикациях в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, из них 3 статьи в международных журналах, индексируемые базами данных Scopus/Web of Science, 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

- Результаты диссертационных исследований использованы в АО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева» (см. соответствующую справку об использовании в приложении к диссертации).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

1. **Simonova, O.S.** Infrared thermographic testing of hyperconductive flat heat pipes / O.S. Simonova, A. O. Chulkov, V. P. Vavilov and other // Optical Engineering 57(3) – 035105 (March 2018).
2. **Simonova, O.S.** Active thermal testing of hyperthermoconductive panels / O. S. Simonova, A. O. Chulkov, V. P. Vavilov and other // Russian Journal of Nondestructive Testing . – 2017. – Vol. 53. – № 6. – P. 453–456.
3. **Симонова, О.С.** Активный тепловой контроль гипертеплопроводящих панелей / О. С. Симонова, А. О. Чулков, В. П. Вавилов и др. // Дефектоскопия. – 2017. – №. 6. – С. 58–62.
4. **Simonova, O.S.** Analyzing the thermal regime of power supply units in portable betatrons by using infrared thermography / O. S. Simonova, S. V. Kasjyanov, A. I. Moskovchenko and other // MATEC Web of Conferences . – 2016. – Vol. 92. – Article number 01017. – p. 1-4.
5. **Симонова, О.С.** Приближенная оценка теплового состояния активных элементов при малых числах Фурье ($Fo < 0,01$) / В. С. Логинов, О. С. Симонова, Д. А. Симонов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 1. – С. 112–117.

6. **Симонова, О. С.** Одномерная нестационарная модель тепловыделяющей системы из произвольного числа твэлов и неактивных элементов / Симонова О. С. , Логинов В. С. // Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 5-3. – С. 503–506.
7. **Симонова, О. С.** Оценка нестационарного температурного режима в полой цилиндрической тепловыделяющей сборке при несимметричных условиях охлаждения / В. С. Логинов, О. С. Симонова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 4. – С. 107–113.
8. **Симонова, О. С.** Температурный режим центральных вкладышей электромагнита-бетатрона / С. В. Касьянов, О. С. Симонова, Д. А. Симонов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 1/2. – С. 94–97.
9. Программа расчета нестационарного температурного поля в полом цилиндрическом активном элементе с произвольным числом слоев тепловой изоляции: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012612616/ А.Р.Дорохов, О.С.Симонова, В.И.Сунгатулина; заявл. 25.01.2012; опубл. 13.03.2012г.
10. **Симонова, О. С.** Приближенное обобщенное решение теплового состояния тела при малых числах Фурье ($Fo < 0,01$) / В. С. Логинов, О. С. Симонова // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №. 4. – С. 14–17.
11. **Симонова (Шабунина), О. С.** Приближенные методы оценки теплового состояния элемента при малых ($Fo < 0,02$) и больших ($Fo > 0,1$) числах Фурье / В. С. Логинов, О. С. Симонова (Шабунина) // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – №. 1. – С. 70–74.
12. **Симонова, О.С.** О выборе числа охлаждающих каналов в обмотке электромагнита малогабаритного трансформатора-бетатрона / О.С. Симонова // III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск. – 04-06 октября 2012. – С. 99-101.
13. **Симонова, О.С.** Стационарный температурный режим центральных вкладышей электромагнита – бетатрона / О.С. Симонова //XIV Всероссийская научно – техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск, Россия. – 24-26 апреля 2013г. – с. 587-590.
14. Программа Расчет температурных полей в анизотропных телах с внутренними источниками тепловыделения: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615919/ М.С.Суханов, О.С.Симонова, В.П. Вавилов, А.О.Чулков; заявл. 05.04.2018; опубл. 18.05.2018 г.