

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

*На правах рукописи*

СИМОНОВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

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

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор В.П. Вавилов

Томск – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
<b>Глава 1 Обзор пассивных и активных методов теплового контроля применительно к объектам электронной техники.....</b>	<b>11</b>
1.1 Общие сведения.....	11
1.2 Краткая хронология ИК-термографии.....	14
1.3 Тепловой контроль в радиоэлектронике.....	26
1.4 Выводы по Главе 1 .....	31
<b>Глава 2 Моделирование теплопередачи в изделиях микроэлектроники.....</b>	<b>32</b>
2.1 Постановка задачи .....	32
2.2 Интегральная микросхема и ее тепловая модель.....	33
2.3 Аналитическая модель .....	36
2.3.1 Прямая задача моделирования .....	36
2.3.2 Обратная задача дефектометрии .....	40
2.3.3 Численное решение трехмерной задачи.....	41
2.4. Обработка экспериментальных ИК изображений.....	44
2.5 Выводы по Главе 2.....	52
<b>Глава 3 Упрощенный аналитический подход к оценке переходных тепловых режимов элементов радиоэлектроники при различных условиях теплообмена.....</b>	<b>53</b>
3.1 Обоснование необходимости исследований.....	53
3.2 Приближенные методы оценки теплового состояния элементов при малых ( $Fo < 0,02$ ) числах Фурье.....	55
3.3 Приближенные методы оценки теплового состояния элементов при больших ( $Fo > 0,1$ ) числах Фурье.....	57
3.4 Выводы по Главе 3.....	60
<b>Глава 4 Анализ теплового режима блоков питания малогабаритных бетатронов.....</b>	<b>62</b>

4.1 Краткое описание объекта исследования.....	62
4.2 Результаты тепловизионной диагностики блока питания бетатрона.....	65
4.3 Выводы к Главе 4.....	67
<b>Глава 5 Активный тепловой контроль гипертеплопроводящих тепловых труб, используемых для теплоотвода в бортовых электронных устройствах.....</b>	<b>68</b>
5.1 Объекты контроля, аппаратура и методы исследований.....	68
5.2 «Сквозная» температуропроводность ГТП.....	71
5.3 «Поперечная» температуропроводность ГТП.....	73
5.4 Анализ динамики теплоотвода в ГТП (случай одиночного теплового источника).....	78
5.5 Выводы по Главе 5.....	80
<b>Заключение.....</b>	<b>81</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений.....</b>	<b>84</b>
<b>Словарь терминов.....</b>	<b>86</b>
<b>Публикации автора.....</b>	<b>87</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>89</b>
<b>Приложение А Акт использования результатов диссертационных исследований.....</b>	<b>102</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Процессы генерации, трансформации и обмена тепловой энергией сопровождают работу всех без исключения технических устройств и в более широком смысле являются неотъемлемой характеристикой человеческой цивилизации. Очевидно, что анализ тепловых процессов и сопровождающих их температурных полей стационарного или динамического характера позволяет оценивать тепловые характеристики взаимодействующих объектов. Данный факт обуславливает растущее применение тепловизионной аппаратуры в технической диагностике и неразрушающем контроле (НК), которое до недавнего времени сдерживалось высокой стоимостью и узкой номенклатурой тепловизоров. Тем не менее, в чисто коммерческом плане, ситуация существенно изменилась в последнее десятилетие с появлением на рынке широкого набора моделей тепловизоров различного технического уровня (от элитных до домашнего применения) и стоимости. 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 и хорошие традиции, начиная с работ Н.С. Данилина, Л.Г. Дубицкого, Ю.А. Концевого, А.Б. Сосновского, О.Д. Бакланова, Н.Ф. Майниковой [1–13]. 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. Будадина, А.В. Лукьянова [14–16]). В качестве отдельной тенденции следует отметить внедрение принципов активного ТК, где опыт российских исследований особенно обширен, см. работы В.П. Вавилова, О.Н. Будадина, Е.В. Абрамовой [17–20]. Тем не менее, количество отечественных современных публикаций по применению ТК в радиоэлектронике сравнительно невелико. 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.

Информацию о зарубежных исследованиях по тепловому контролю радиоэлектронных устройств можно найти в [21–23].

**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 продемонстрированы 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 диссертационной работы:** на основе теплофизического подхода к тепловому контролю (ТК), заключающегося в анализе переходных тепловых процессов, выполнить теоретические и экспериментальные решения ряда специфических задач теплового неразрушающего контроля узлов и изделий электронной техники.

Для достижения вышеуказанной цели в работе были поставлены следующие задачи:

- 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.

**Объект исследования** – активный и пассивный тепловой неразрушающий контроль изделий электронной техники.

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

### **Научная новизна работы**

- 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 государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615919).

- Разработана методика неразрушающих испытаний качества гипертеплопроводящих панелей (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  $4,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, в среднем различаясь в 2 раза для различных экземпляров ГТП вследствие различной массы теплоносителя. Теплопроводность в сквозных направлениях находилась для конкретного изделия в диапазоне от  $10,3 \cdot 10^{-5}$  до  $14,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/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:**

Выполнены исследования по тепловому контролю 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»).

### **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 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» (Приложение А).

**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  $0,01^\circ\text{C}$ . Используемая 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 общефизическим 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» - ТВЕТ-2016 (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 грантами**

Диссертационные исследования связаны с выполнением гранта РФФИ № №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.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР ПАССИВНЫХ И АКТИВНЫХ МЕТОДОВ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБЪЕКТАМ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

## 1.1 Общие сведения

Обзорная глава 1 настоящей диссертации написана по материалам книг, брошюр и обзорных статей, опубликованных в различное время сотрудниками лаборатории «Тепловой контроль» Томского политехнического университета.

Неразрушающий контроль (НК) как прикладную научно-техническую дисциплину стали активно разрабатывать после Второй мировой войны с началом формирования современной технологической цивилизации. Поскольку понятия «неразрушающие испытания» и «диагностика» в определенной степени размыты, сравнительно трудно обнаружить самую первую (пионерскую) работу в области как НК в целом, так и собственно тепловых методов. Что касается теплового контроля (ТК), например, еще в 1935 г. J. Nichols предложил контролировать качество горячего проката путем анализа температуры на поверхности металлических заготовок, что позволило выявлять краевые расслоения [24]. В 60-х гг. XX века D. Green [25] и W. Beller [26] предложили использовать тепловую стимуляцию тепловыделяющих элементов ядерных реакторов и корпусов ракет в комбинации с регистрацией динамических температур по ИК-излучению. Работа D. Green интересна тем, что в ней были заложены принципы подавления наиболее серьезной для ТК помехи, обусловленной как низкой величиной, так и флуктуациями, коэффициента излучения на поверхности контролируемого материала.

В бывшем СССР термин «ИК-интроскопия» был введен основателем советской школы НК П.К. Ощепковым. В конце 1960-х гг. Н.А. Бекешко, Ю.А. Попов, В.П. Вавилов, А.Е. Карпельсон, А.Б. Упадышев и др., будучи вдохновленными зарубежными публикациями, положили начало развитию активного теплового контроля (ТК) в СССР [27–29]. В 1970-80-х гг. тепловидение и ТК в СССР испытали определенный бум. В эти годы весьма бурно развивался

ТК изделий радиоэлектроники, в частности, в ряде отечественных организаций, таких как ВНИИ «Электронстандарт» и др., были созданы специализированные установки, прежде всего, для испытаний компонент микроэлектроники [5–11].

На фоне сенсационного успеха тепловизоров фирмы AGA, Швеция (затем — AGEMA, Швеция, ныне — FLIR Systems, США) в России было выбрано три пути развития отечественного тепловидения:

1) использование отечественных достижений в области ИК-оптики и ИК-детекторов (ГОИ им. С.И. Вавилова, М.М. Мирошников, тепловизоры «Филин», «Радуга», «Статор»); в более поздние годы была разработана ставшая успешной на многие годы модель оптико-механического тепловизора «Иртис» (ООО «Иртис», М.И. Щербаков); в этом же направлении создавались установки ТК радиоэлектронных изделий (ВНИИ «Электронстандарт»);

2) копирование аппаратуры фирмы AGA (AGEMA Infrared Systems), Швеция (НИИ «Исток», А.Г. Жуков, тепловизор ТВ-03);

3) копирование зарубежных тепловизоров с учетом доступной отечественной элементной базы (Московский НИИ интроскопии, МИРЭА, А.А. Кеткович, Н.Д. Куртев, тепловизоры АТП, ИФ-10ТВ); в области активного ТК акцент был сделан на испытания ответственных материалов и изделий военно-промышленного комплекса. Ю.Г. Гавинский (НПО «Алтай») создал специализированный тепловой дефектоскоп на базе самодельного термоэлектрического термометра; весьма интенсивными в те годы были работы по созданию устройств ТК изделий радиоэлектроники (ВНИИ «Электронстандарт» и др., Н.С. Данилин, Л.Г. Дубицкий, Ю.Д. Концевой и др.).

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. Это явилось своеобразным сюрпризом для мирового сообщества, когда начались интенсивные контакты отечественных и зарубежных исследователей. В эти годы В.П. Вавилов и В.В. Ширяев в Томском

политехническом университете предложили идею динамической тепловой томографии (dynamic thermal tomography), вводя в мировую практику идею так называемых таймограмм (timegram) [30]. Другой принцип тепловой томографии, который за рубежом получил название нелинейной подгонки (non-linear fitting), разрабатывался в СССР Д.А. Рапопортом, О.Н. Будадиным и др. [31]. В 1991 г. при поддержке руководителя теплофизической лаборатории Управления по аэронавтике Франции D. Balageas В.П. Вавилов опубликовал одновременно на английском и французском языках обзор исследований по активному тепловому контролю в бывшем СССР [32].

Следует констатировать, что годы перестройки были пагубными для отечественного ТК. Фактически были утеряны отечественные достижения в области ТК изделий радиоэлектроники, что, в первую очередь, было обусловлено развалом отечественной радиоэлектронной промышленности. Однако, именно в эти годы в мире сложилось несколько научно-исследовательских групп, сохраняющих активность в течение длительного времени: США (R.D. Thompson, L.D. Favro, P. Kuo, S. Shepard, D. Burleigh, S. Holland, G. Stockton, J. Snell), Франция (D. Balageas, J.-C. Krapez, A. Degiovanni, V. Ayvazyan), Германия (G. Busse, C. Maierhofer, I. Solodov, H. Wiggenshauser, A. Dillenz), Великобритания (D. Almond), Италия (E. Grinzato, S. Marinetti, P. Bison), Австрия (B. Oswald-Tranta, G. Maug), Япония (T. Sakagami), Финляндия (Y. Rantala, T. Kauppinen). Обзор этих исследований можно найти в монографиях В.П. Вавилова [33–35]. В последние годы стремительно наращивают активность специалисты из Китая (Guo Xingwang) и Индии (R. Mulaveesala, S. Tuli, K. Srinivas) [36, 37].

В технически передовых странах пассивный ТК широко применяется производителями электронной аппаратуры. В США активный тепловой метод применялся при контроле ракет Atlas, расследовании причин катастрофы корабля Columbia, а также при проверке состояния кромки крыла челнока Discovery (при выходе космонавта M. Fossum в открытый космос). Естественной и устоявшейся сферой применения пассивной тепловизионной диагностики являются энергоаудит в строительстве и диагностика электротехнического оборудования.

Возможен второй всплеск интереса к тепловому методу в медицинской диагностике (первый бум наблюдался в конце XX-го века, сменившись определенным скептицизмом медиков из-за сложности интерпретации результатов диагностики).

## 1.2 Краткая хронология ИК-термографии

Роль ИК-тепловизоров как основного инструмента ТК трудно переоценить (поэтому данный метод контроля часто называют тепловизионным). В таблице 1.1 представлен обзор истории развития мировой ИК-термографии с определенным акцентом на российские исследования, а в таблице 1.2 приведена терминология ТК, принятая в зарубежной и отечественной научно-технической литературе. Справедливости ради следует заметить, что таблица 1.2 в том или ином виде воспроизводилась в ряде статей и диссертаций томской школы ТК и здесь приведена для полноты изложения материала; кроме того, использованы положения международного стандарта ISO 10878.

Таблица 1.1 – Краткая хронология ИК-термографии  
(компиляция сведений из [38, 39])

Год или период, лет	За рубежом	В России (в т.ч. в СССР) *
Более 2000 лет назад	Существование тепловых лучей (современный термин: «инфракрасное излучение») было упомянуто в поэме Тита Лукреция Кара «De Rerum Natura» («О природе вещей»)	
1757		Имеются сведения, что М.В. Ломоносов разрабатывал фокусирующие зеркала из меди и создал «ночную трубу» в качестве усилителя яркости для ночного видения (!).
1770	Французский ученый М.-А.	

	Пикте (М.-А. Pictet) описал свои ставшие знаменитыми эксперименты по фокусировке тепла и холода.	
1800	Официальное открытие теплового излучения (ИК) приписывают английскому астроному У. Гершелю (W. Herschel).	
1840	Д. Гершель (J. Herschel) предложил устройство для визуализации теплового излучения по картине испарения спирта на бумаге. Позднее это устройство назвали эварорографом.	
1900	А. Эйнштейн, М. Планк, В. Вин, Г. Кирхгоф открыли законы теплового излучения.	Б.Б. Голицын, А.В. Столетов внесли существенный вклад в теорию теплового излучения.
1927		Я.Е. Покровский выполнил эксперименты по дистанционному обнаружению морских судов.
1928	Г. Холст (G.Holst) и Дж. Де Боев (J.H. de Boer) разработали первый преобразователь ИК-изображения в видимое со спектральным диапазоном до 1,5 мкм.	
1935		П.В. Тимофеев, В.И. Архангельский и Е.С. Ратнер начали исследования по ночному видению во Всесоюзном институте электротехники.
1935—1945	Военная аппаратура ночного видения в ближнем ИК-диапазоне. Коммерческое производство ИК-детекторов. Информация о разработках	Первое поколение приборов ночного видения (С-1 и С-2) поступило в Советскую Армию (исключительно отечественной разработки). В 1943 г. прибор

	ИК- технологий исчезла из открытой печати. В Германии широко применяют неохлаждаемые и охлаждаемые PbS ИК-детекторы.	ночного видения «Омега» использовался для проводки судов Черноморского флота в условиях плохой видимости.
1946—1947	В США фирма Texas Instruments начала разработку линейных ИК - сканеров (1947).	По инициативе С.И. Вавилова с началом холодной войны организован НИИ № 801, позднее — Институт прикладной физики, ныне — НПО «Орион»
1950-е	Американская фирма Barnes разработала бортовой ИК-сканер как прототип будущих тепловизоров (1954).	Быстрое развитие полупроводниковых ИК - детекторов. Разработка ночных прицелов, приборов ночного видения и устройств наведения снарядов в научно-исследовательских организациях Москвы и Ленинграда. Начало разработки германиевых и кремниевых фотодиодов и фототриодов в НИИ № 801.
1960-е	ИК-сканеры способны строить изображения за 5 минут.	В НИИ № 801 разработаны первые «мозаичные» (современный термин — «матричные») ИК-детекторы на базе Ge и Si с матрицей из 2×2 и 4×4 элементов.
1965	Шведская компания AGA (позднее — AGEMA Infrared, ныне — американская компания FLIR Systems) вывела на рынок первый измерительный тепловизор (при поддержке правительства Швеции в рамках программы борьбы с энергетическим кризисом).	Единичные экземпляры тепловизоров AGA появились в СССР и стали вдохновляющим примером для разработки отечественных тепловизоров. НИИ прикладной физики разработал отечественный фотодетектор на базе антимонида индия и первый отечественный тепловизор для диапазона 3–5 мкм.
1973	Фирма AGA выпустила	ГОИ им. С.И. Вавилова разработал

	первый портативный тепловизор с батарейным питанием (модель 750).	отечественный приемник на базе Ge:Аи и тепловизор «Прогресс», не получивший дальнейшего развития.
1987	Фирма АGЕМА выпустила портативный одноблочный тепловизор (модель 470) с термоэлектрическим холодильником и цифровой записью термограмм на съемный носитель. За рубежом значительное внимание уделяется разработке ИК - приемников типа КРТ (кадмий—ртуть—теллур).	
1990-е	На рынке появляются на микроболометрических матричных ИК-детекторах, а также детекторах, использующих «квантовые ямы». Американская фирма Inframetrics разработала тепловизор камкордерного типа (1995). Другая американская фирма Infrared Solutions в 1997 г. выпустила экономичную ИК- камеру типа snap-shot (одновременный съем сигнала со всех точек матрицы).	В Институте физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск) разработан неизмерительный тепловизор на матричном ИК-детекторе для медицинского применения. Приобрел популярность сканирующий измерительный тепловизор ИРТИС-200 (затем ИРТИС-2000) компании ИРТИС (М.И. Щербаков); его основное применение – техническая диагностика.
2000-е	Универсальные тепловизоры с записью текстовых и звуковых комментариев, GPS-системой, системой Bluetooth и т.п. (тепловизор Therna CAM PM 695 фирмы	Красногорский механический завод (КМЗ) разработал портативный тепловизор «Джокер» на отечественной элементной базе. Дальнейшая информация о его производстве и

	FLIR Systems).	<p>продажах отсутствует.</p> <p>Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) (г. Казань) разрабатывает тепловизоры 3-го поколения. Полноформатные матрицы неохлаждаемого типа для нового тепловизора созданы в ЦНИИ «Цикло» (использована отечественная матрица размером 2×256 и 4×288).</p>
2010-е	<p>Исследовательские тепловизоры с высокой частотой кадров. Тепловизоры с матрицей более одного миллиона пикселей.</p>	<p>Номенклатура матричных тепловизоров не расширяется. Тепловизор ИРТИС испытывает растущую конкуренцию со стороны зарубежных низкостоимостных тепловизоров с матрицами 320×240 и 160×120.</p> <p>Ведутся разработки отечественных танковых тепловизионных прицелов («Агава»). КМЗ разработал тепловизионный канал оптико-электронной системы военного применения «Зеница» на базе матрицы 256×290 диодов Шоттки в спектральном диапазоне 3–5,5 мкм.</p> <p>Институт физики полупроводников объявил о разработке отечественной микроболометрической матрицы и тепловизора на его основе. ЦНИИ «Циклон» разработал ружейный тепловизионный прицел «Шахин» на болометрических матрицах 160×120, 384×288 и 640×480, видимо, зарубежного производства.</p>

2013	Американская ассоциация DARPA объявила о разработке длинноволновой ИК-камеры с размером матрицы 1280×720.	Уральский оптико-механический завод (УОМЗ), входящий в состав холдинга Госкорпорации Ростех «Швабе», разработал гражданские системы оптического наблюдения СОН 730, СОН 820 и СОН-М-02, а также соответствующие системы военного применения. Системы снабжены тепловизорами зарубежного производства.
2016	FLIR Systems предлагает модуль Lepton (диапазон длин волн 8–14 мкм, чувствительность 50 мК, матрица 80×60, частота смены изображений 8,6 Гц, масса 0,55 г (!), размеры 8,5×8,5×5,6 мм с разъемом). Модуль более высокого качества Boson фирмы FLIR Systems имеет массу 7,5 г.	Фирма «Пульсар», будучи представителем компании Cluny Country Optics (Великобритания), поставляет на российский рынок тепловизионные прицелы, приборы ночного видения по цене 120–250 тыс. руб. Сведения о разработке и производстве отечественных охлаждаемых и микроболометрических матрицах противоречивы.
2018	Мировые тенденции к расширению номенклатуры тепловизоров сохраняются. Фирмы США, Германии, Израиля предлагают коммерческие тепловые дефектоскопы. Расширяется присутствие китайских тепловизоров на мировом рынке.	Организация «Астрон» (г. Лыткарино) предлагает «российские» тепловизионные модули, однако в их основе лежат неохлаждаемые микроболометрические матрицы производства Франции и Китая. Вследствие западных санкций известная американская фирма FLIR Systems объявила о прекращении поставок тепловизоров в Россию.

\* Автором использована информация, доступная в сети Интернет.

Таблица 1.2 – Краткая терминология ТК\*

Термин	Описание
<b>Общие термины</b>	
Активный ТК (stimulated, forced, active)	Испытания материалов с использованием дополнительного источника теплового стимулирования.
Дефектометрия (defect characterization, identification)	Определение параметров дефекта по экспериментальным данным с использованием алгоритмов решения обратных задач математической физики.
Дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа (differential parabolic equation of heat conduction)	$a \nabla^2 T = \partial T / \partial \tau;$ $a$ – температуропроводность, $\tau$ – время, $T$ – температура.
ИК НК (IR NDT)	Испытания материалов путем анализа их ИК (теплового) излучения; как правило, этот термин обозначает наиболее распространенную разновидность теплового (ИК) НК.
Нестационарный, динамический ТК (transient, dynamic)	Температура объекта контроля изменяется во времени.
Обратная задача теплового НК (inverse problem)	По экспериментально регистрируемым изменениям температуры во времени и пространстве определяют конфигурацию тела и дефектов (ТФХ).
Пассивный ТК (passive)	Дополнительный источник теплового стимулирования отсутствует.
Прямая задача теплового НК (direct problem)	Для известной конфигурации объекта и дефектов (известных ТФХ) определяют изменения температуры во времени и пространстве.
Стационарный ТК (steady-state, stationary)	Температура объекта контроля не изменяется во времени.
Тепловой НК «на отражение», односторонняя техника	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на одной и той же поверхности образца.

(reflection mode, front-surface, or one-sided test)	
Тепловой НК (thermal NDT)	Испытания материалов путем анализа тепловых потоков (температурных полей); в отличие от исследования технологических процессов и технического обслуживания с прогнозом (condition monitoring & predictive maintenance)) этот термин относится к тем случаям, когда перед испытанием температура объекта контроля равна температуре окружающей среды, поэтому необходима тепловая стимуляция объекта.
Тепловой НК «на просвет» (transmissionmode, rearsurface, or two-sided test)	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на противоположных поверхностях образца.
Термографический НК (IR thermographic NDT)	Испытания материалов с применением термографии (тепловидения).
<b>Процедуры ТК</b>	
Анализ в пространственной Области (space-domain analysis)	Анализ амплитудных распределений (температуры).
Анализ во временной области (time-domain analysis)	Анализ изменений (температурных) сигналов во времени.
Анализ в частотной области (frequency-domain analysis)	Анализ частотного спектра (температуры).
Двухканальная ИК-термография (dual band IR imaging)	В тепловом НК: совместное применение коротко - и длинноволнового каналов, в результате чего возможно разделение информации о температуре и коэффициенте излучения.
Дифференциальная термография (differential thermography)	Выделение динамических компонент в термограмме, как правило, путем вычитания эталонного изображения.

ИК-томография (infrared tomography)	Послойное (томографическое) представление структуры полупрозрачных объектов (газов) с использованием принципов компьютерной томографии.
Импульсная ультразвуковая термография (ultrasonic burst excitation)	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия импульсными ультразвуковыми волновыми пакетами.
Импульсная фазовая Термография (pulsed phase thermography)	Обработка термограмм в частотной области с построением «фазограмм» (преимущественно с использованием преобразования Фурье).
Импульсный метод (flash technique)	Длительность тепловой стимуляции существенно меньше характерного времени наблюдения; как правило, нагрев производят с помощью импульсного лазера или лампы-вспышки (см. <i>Импульсный тепловой контроль</i> ).
Импульсный ТК (pulsed thermal NDT)	Объект стимулируют с помощью кратковременного теплового импульса.
Метод вейвлет (волновых)-функций (wavelet transform)	Разновидность импульсной фазовой термографии, использующая разложение функции оригинала по базисным вейвлет-функциям.
Метод «миража» («mirage» technique)	Разновидность фототермического метода, при котором объект стимулируют с помощью модулированного лазерного излучения, а температурные аномалии измеряют по отклонению зондирующего лазерного луча, пересекающего зону нагрева.
Метод синхронной регистрации сигнала, метод «временных ворот» (synchronous, lock-in, box-car, time-gate, time-resolved technique)	Метод теплового НК, предусматривающий регистрацию сигнала в выбранном временном окне при фиксированной задержке относительно нагрева.
Метод тепловых волн (thermal wave technique, lock-in thermography)	Тепловую стимуляцию объекта производят путем периодического (гармонического) нагрева, в результате чего в объекте возникают тепловые волны; как правило, температуру регистрируют в квазистационарном режиме.
Метод термоупругих	Обнаружение скрытых дефектов путем возбуждения в

испытаний (thermoelastic inspection)	объекте термоупругих механических напряжений.
Полиномиальная аппроксимация (polynomial fitting)	Аппроксимация изменения температуры во времени с помощью полиномов с целью сглаживания шумов и замены длинных экспериментальных последовательностей изображениями полиномиальных коэффициентов.
Профилирование глубины (depth profiling)	Восстановление структуры объекта по глубине (см. <i>Глубинограмма</i> ).
Реконструкция термографического сигнала (thermographic signal reconstruction – TSR)	Метод запатентован фирмой Thermal Wave Imaging (США), является одним из вариантов <i>синтетической обработки сигнала</i> .
Синтетическая обработка Сигнала (synthetic processing)	Метод запатентован фирмой Thermal Wave Imaging (США). Разработан для одностороннего импульсного ТК и включает: 1) полиномиальную аппроксимацию экспериментальных данных в логарифмических осях; 2) восстановление последовательности термограмм; 3) анализ первой и второй производных от температуры по времени.
Синхронная термография (lock-in thermography)	Стимуляция объекта тепловыми волнами сравнительно низкой частоты при синхронной регистрации термограмм с выделением фазовых характеристик (см. <i>Метод тепловых волн</i> ).
Синхронная ультразвуковая термография (ultrasonic lock-in thermography)	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия упругими периодическими ультразвуковыми волнами.
Синхронная фазовая термография (phase-locked IR imaging)	Термин относится к термографии вращающихся объектов.
Тепловая	Послойное (томографическое) представление структуры

(динамическая) томография (thermal tomography)	объекта путем анализа сигналов во временной области при одностороннем ТК.
Теплоголография	Совместная регистрация термограмм и голографических интерферограмм при нагреве изделия (близкий западный термин: «shearography» – широкография).
Техника «летающего пятна» («flying spot» technique)	Тепловой НК путем сканирования объекта тепловым стимулирующим пучком при синхронной регистрации температуры в локальной зоне на фиксированном расстоянии от точки нагрева (скорость сканирования относительно высока).
Техника «ползущего пятна» («crawling-spot» technique)	То же, что техника «летающего пятна» (скорость сканирования относительно низка).
Фазочувствительная модуляционная термография (phase-sensitive modulation thermography)	Термин относится к <i>синхронной термографии</i> (подчеркивается, что фазовые характеристики определяют в каждой точке изображения с построением <i>фазограммы</i> )
Фототермическая ИК-термография (photothermal IR thermography)	Разновидность фототермического метода, в котором нагрев изделия и регистрацию температуры осуществляют в малой зоне, однако вместо ИК-радиометра используют тепловизор; в других случаях термин обозначает оптический нагрев относительно больших зон при тепловизионной регистрации температуры (см. <i>Фототермический метод</i> ).
Фототермический (фототепловой) метод (photothermal, optothermal method)	Тепловую стимуляцию объекта производят с помощью оптического излучения (как правило, возбуждают тепловую волну в локальной зоне малого размера и производят сканирование объекта по точкам).
Эхоимпульсный метод тепловых волн (pulse-echo thermal wave approach)	Температурные сигналы трактуют как результат суперпозиции тепловых волн (см. <i>Импульсный тепловой контроль</i> ).
<b>Параметры</b>	
Информативный	Параметр, используемый для обнаружения сигнала (см.

параметр (significant parameter)	<i>Анализ в пространственной, временной, частотной области).</i>
Нормализованный температурный контраст (normalized temperature contrast)	$C^{норм}(x, y, \tau) = \frac{T(x, y, \tau) - T_{cp}(x, y)}{T^{норм}(x, y, \tau^{норм}) - T_{cp}(x, y)} - \frac{T_{эм}(x, y, \tau) - T_{cp}(x, y)}{T^{норм}(x, y, \tau^{норм}) - T_{cp}(x, y)};$ <p><math>T^{норм}(x, y, \tau^{норм})</math> – температура текущей точки в момент времени <math>\tau^{норм}</math>, принятая в качестве нормализующего значения (как правило, момент времени <math>\tau^{норм}</math> соответствует окончанию нагрева <math>\tau_{нагр}</math>).</p>
Оптимальное время наблюдения (optimum observation time, thermal dwell time)	Момент времени $\tau_m$ , при котором обеспечивается максимальное значение информативного параметра (отношения сигнал/шум).
Раннее время обнаружения (earlydetectiontime)	Момент времени, при котором температурный сигнал $\Delta T(\tau)$ начинает превышать уровень шума (как правило, значительно меньше времени $\tau_m$ ).
Текущий контраст температуры (running temperature contrast)	$C^{тек}(x, y, \tau) = \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T(x, y, \tau) - T_{cp}(x, y)};$ <p><math>T_{cp}(x, y)</math> – начальная температура (температура окружающей среды).</p>
Температурный сигнал (temperature signal)	$\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{эм}(x, y, \tau)$ – амплитудный информативный параметр; $T_{эм}(x, y, \tau)$ – эталонная температура.
Характерное время теплопередачи (heat transit time)	Характерный момент во временном развитии температуры $\tau^*$ , используемый для обнаружения дефекта и оценки его параметров (является временным информативным параметром).
<b>Представление данных</b>	
Амплиграмма или Модулограмма (ampligram, or modulegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит величину модуля Фурье-образа на выбранной частоте.
Изображение	Карта термоупругих напряжений, построенная на основе

термоупругих Напряжений (thermoelastic stress analysis image)	анализа динамических термограмм в процессе механического нагружения.
Максиграмма (maxigram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит максимальную (в исследуемой последовательности термограмм) величину информативного параметра (температурного сигнала) независимо от времени его появления.
Таймограмма (timegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующую величину <i>характерного времени теплопередачи</i> .
Тепловая томограмма (thermal tomogram)	Изображение распределения ТФХ объекта в пределах выделенного по глубине слоя.
Фазограмма (phasegram)	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующую величину фазы (сдвига фаз).
Хронологическая термограмма (chronological thermogram)	Изменение температуры в отдельной точке во времени.

\* Подробный список терминов ТК приведен в монографии В.П. Вавилова [33]. Описание ряда терминов позаимствовано из международного стандарта ISO 10878.

### 1.3 Тепловой контроль в радиоэлектронике

Рост функциональной значимости и сложности, а также сохраняющаяся тенденция к миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры, привели к большим трудностям обеспечения ее качества и надежности. Традиционные статистические методы оценки качества и надежности требуют больших выборок и значительной продолжительности испытаний. Поэтому они стали малопримемыми при решении задач неразрушающего контроля. Более того, в условиях развивающегося машинного проектирования и автоматизации производства классический путь контроля и обеспечения надежности стал фактически

неприменим в связи с тем, что жизненный цикл аппаратуры становится меньше продолжительности требуемых испытаний.

В 1980-х годах наметилась тенденция разработки комплексных программ обеспечения надежности, включающих использование априорной информации, построение вероятностно-физических моделей, применение физико-технических методов неразрушающего контроля и новых средств измерения с высокими метрологическими показателями [1].

Общие методы НК развиваются давно [6], их совершенствованием занимаются большие коллективы и специализированные организации.

Наряду с обычными методами НК – ультразвуковым, радиационным, магнитным, рентгеновским – все более популярным становится тепловой метод НК.

В основе всех тепловых методов НК лежит связь между тепловым потоком и температурным градиентом, который возникает при наличии дефектов в исследуемых объектах. Температура элементов радиоэлектроники является одним из ключевых факторов, определяющих их долговечность в рабочем режиме. В СССР для анализа тепловых режимов электронных схем использовались термопары [4–6]. Недостатком данного метода является наличие теплового контакта между термопарой и объектом исследования. ИК метод контроля свободен от этого недостатка. Примером может служить применение этого метода американской компанией Raytheon [40]. После проверки на выходе производственной линии по электрическим параметрам одна из ключевых интегральных микросхем (ИМС) была признана годной. Однако проверка ее теплового рельефа показала, что один из резисторов имеет слишком высокую температуру, указывающую на плохое соединение резисторов с материалом подложки. Данная ИМС имела скрытый дефект, который мог бы привести в скором времени к выходу ее из строя. На основании результатов ИК контроля ИМС была забракована.

Для оценки качества исследуемого объекта, выявления скрытых дефектов в радиоэлектронной аппаратуре и нарушений сплошности в материалах могут использоваться как пассивный, так и активный методы ТК.

Особенность активного метода состоит в использовании внешнего источника тепловой энергии для формирования режимов стационарного и нестационарного нагрева с последующим исследованием теплового поля поверхности объекта. Контроль качества исходных материалов и готовых изделий радиоэлектроники методом активного ТК основан на том, что различного рода дефекты (трещины в металлах и неметаллах; прожоги, непровары, раковины в точечных сварных соединениях; отсутствие связи между отдельными элементами в клееных изделиях и т. д.) искажают характер распространения тепла в исследуемых объектах вследствие изменения тепловых характеристик в дефектных участках. При этом в зонах, где имеется дефект, происходит повышение или понижение (в зависимости от характера дефекта и способа регистрации теплового потока) температуры по сравнению с заданной.

Главной проблемой исследования температурных полей изделий радиоэлектроники являются малые габаритные размеры, слабые температурные сигналы и существенные флуктуации коэффициента излучения.

Фирма IBM (США) применяет ТК для обнаружения неисправностей электронных плат и прогнозирования их ресурса [33]. Существенной проблемой при использовании ТК в радиоэлектронике является разброс излучательных свойств используемых материалов, который может значительно превышать 15% [41, 42]. При ТК радиоэлектронных компонент, необходимо знать абсолютную температуру отдельных элементов, т.к. она оказывает влияние на их работу. Для устранения этой проблемы фирма IBM использовала белое порошкообразное покрытие из оксида алюминия.

При пассивных тепловых методах используется собственное тепловое излучение контролируемых объектов при их функционировании в рабочем или специально выбранном контрольном режиме. Применение пассивного метода ТК возможно лишь в случае превышения излучения объекта над окружающим фоном.

Поэтому использование пассивного метода ТК наиболее целесообразно для обнаружения неисправностей в работающих электронных схемах, для оценки эффективности различных теплоотводящих устройств, а также выбора наиболее оптимального размещения тепловыделяющих элементов.

В зависимости от типа материалов, их физико-химических свойств, предполагаемого характера дефекта производится либо одновременный нагрев всего объекта (стационарный тепловой режим), либо последовательный (сканирующий) нагрев отдельных участков объекта (динамический тепловой режим).

При одновременном нагреве, осуществляемом специальными нагревателями (лампами, горячим газом, электрическим током и т. д.), можно выявить такие дефекты, как трещины, пустоты, включения, расположенные перпендикулярно направлению теплового потока и имеющие протяженность, соизмеримую с толщиной изделия. Весьма эффективен стационарный тепловой режим для исследования характера распределения температуры в тепловых трубах, которые в настоящее время находят все более широкое применение для отвода тепла от радиоэлектронных устройств с высокой плотностью компоновки элементов.

На практике применение получил метод ТК, основанный на принципе нестационарного (динамического) теплового режима исследуемого изделия [43, 44]. Данный способ более информативен, универсален, обладает широкими аппаратными и функциональными возможностями. Качество объекта исследования оценивается как по характеру распределения температуры, так и по изменению температуры отдельных участков его поверхности во времени.

При данном методе ТК нагрев объекта осуществляется локальным источником тепла, который перемещается по заданной траектории, обеспечивая нестационарный тепловой режим. В качестве локальных источников тепла могут быть использованы оптические квантовые генераторы, а также ИК излучатели, электромагнитное излучение высокой частоты, плазменная струя и т.д.

В годы СССР отмечалось интенсивное развитие радиоэлектронной промышленности. Первоочередной государственной задачей было повышение технического уровня качества, надежности, и сроков службы изделий.

Проводились интенсивные исследования в области ТК (ВНИИ «Электронстандарт»), в частности, были созданы специализированные системы контроля 14ЭЭП300-021, 09ЭИ-1, АСТД и др. [5, 45]. Теоретические основы моделирования процесса ИК контроля и прогнозирования рабочего ресурса радиоэлектронных компонент были обобщены еще в 1974 г. Н.С. Данилиным с соавторами [6].

В качестве иллюстраций на рисунке 1.1 показаны тепловые поля различных радиоэлектронных компонент при наличии перегретых элементов.

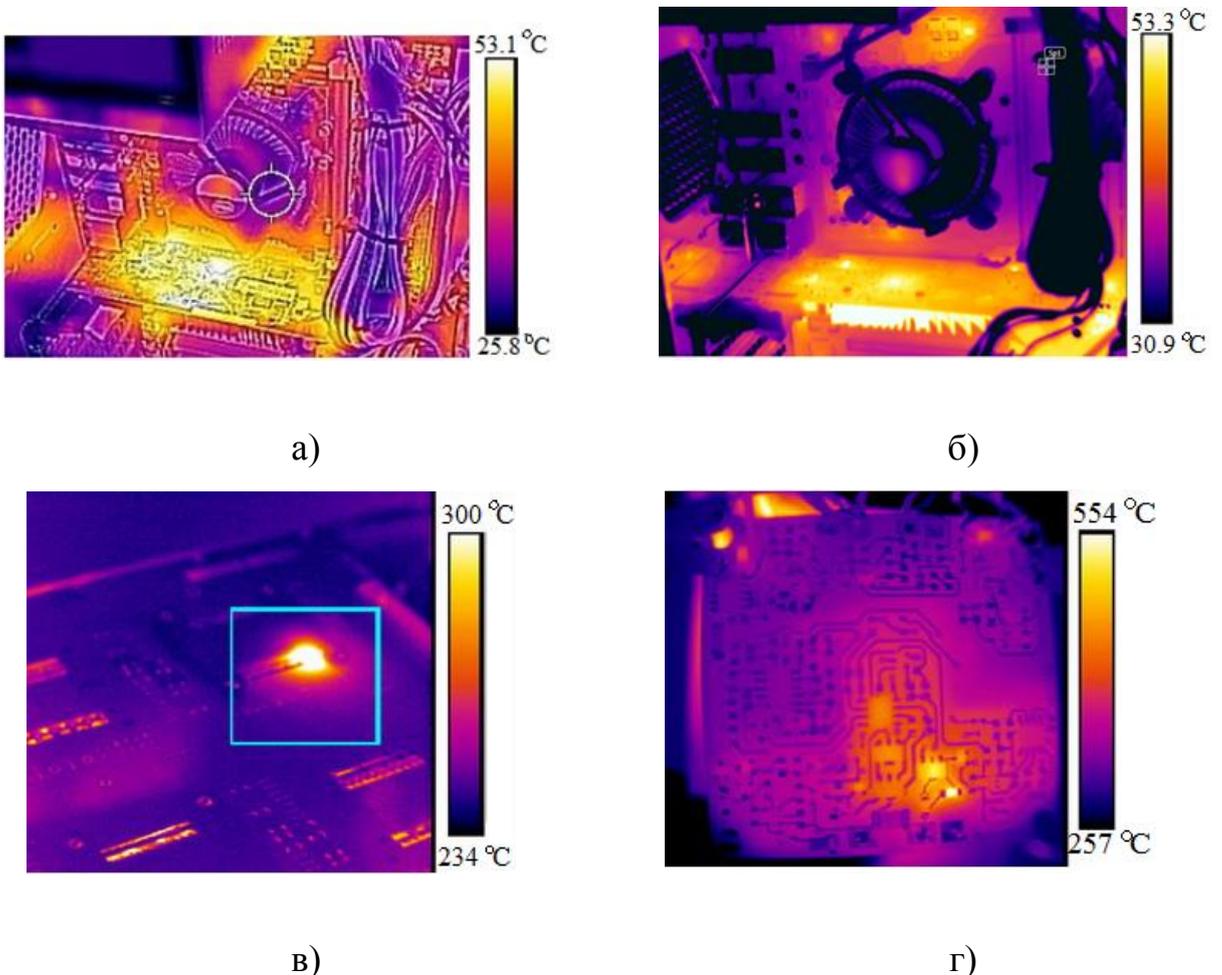


Рисунок 1.1 Тепловые поля радиоэлектронных устройств:  
 а – блок питания компьютера; б – электронная плата; в – участок перегрева на печатной плате; г – печатная плата с перегретым элементом  
 [<http://www.thermoview.ru/articles/primenenie/micro/>]

В последнее десятилетие ряд обзоров в области ТК радиоэлектронных устройств был опубликован К.О. Петросянцем и И.А. Харитоновым [46–49]. Методики ТК мощных электронных элементов на железнодорожном транспорте разрабатываются группой А.В. Лукьянова в ИрГУПС, см., например, кандидатские диссертации А.А. Капустина и В.Н. Перельгина [50, 51].

Зарубежные исследования описаны в работах [52–54]. Подход к ТК радиоэлектронных устройств, основанный на принципе активной стимуляции, восходит к ранним работам О. Breitenstein [55].

#### **1.4 Выводы по Главе 1**

- 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.

- Основными проблемами теплового метода являются необходимость учета коэффициента излучения, величина которого сильно варьируется в зависимости от класса контролируемых изделий.

- Процедуры активного ТК сравнительно мало разработаны, поскольку они приводят к появлению дополнительной «координаты» – времени – при анализе температурной информации и, следовательно, требуют разработки новых алгоритмов выделения сигналов от дефектов на фоне помех. Очевидно, что при этом целесообразно использовать нестационарные теплофизические решения.

- В силу указанных выше факторов, представляется целесообразным проведение исследований по активному ТК изделий радиоэлектроники, чему и посвящена настоящая диссертация.

## ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ИЗДЕЛИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

### 2.1 Постановка задачи

В данном разделе исследований речь идет о применении методов теплофизического моделирования для исследования тепловых режимов изделий микроэлектроники, причем, в отличие от известных подходов, использованы численные решения задач нестационарной теплопроводности в твердых телах, что позволило проанализировать дефекты произвольных размеров. Разрабатывались следующие научно-технические задачи:

- Трехмерное моделирование процесса теплопередачи в бескорпусных интегральных микросхем (ИМС), содержащих дефекты в виде локализованных источников тепловыделения мощностью 10 мкВт и более.
- Разработка алгоритмов выделения сигналов от дефектов на фоне мультипликативных и аддитивных помех, обусловленных оптическими и теплофизическими свойствами ИМС, а также техническими характеристиками устройств контроля, с учетом накопленного в Томском политехническом университете опыта обработки последовательностей ИК термограмм.
- Разработка элементов дефектометрии применительно к оценке параметров локализованных источников тепловыделения.
- Реализация вышеуказанных результатов в двух программных продуктах, предназначенных для моделирования и обработки данных.

Исследованные задачи характеризовались следующими параметрами.

- Источники тепловыделения размером от 10 мкм и более и мощностью 10 мкВт и более в ИМС размером от 20×20 мм. Разрабатываемый программный продукт должен реализовать численное решение трехмерной прямой задачи теплопроводности с использованием опыта Томского политехнического университета в области ТК композиционных материалов.
- Источники мультипликативных помех: неоднородный коэффициент излучения ИМС, неоднородные теплофизические свойства ИМС, отражение

излучения посторонних объектов (теплофизические характеристики исследуемых материалов приведены в таблице 2.1).

- Источник аддитивных помех: детектор излучения ИК устройства, а также внешние источники тепловыделения.
- В исследовании должны быть реализованы известные в тепловом контроле алгоритмы повышения отношения сигнал/шум: 1) фазовый Фурье-анализ, 2) анализ главных компонент, 3) полиномиальная фильтрация, 4) корреляционный анализ, и др., эффективность применения которых выяснится в процессе выполнения работы.
- Алгоритм дефектометрии должен быть основан на оценке мощности тепловыделения в дефекте и определении его пространственной конфигурации, т.е. будет реализовывать решение соответствующей обратной задачи теплопередачи.

Таблица 2.1 – Теплофизические характеристики материалов, используемых в ИМС

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Коэффициент тепло- проводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Коэффициент температу- проводности $a$ , м <sup>2</sup> /с
Кремний	2330	800	84–126	$(45,1–67,6) \cdot 10^{-6}$
Двуокись кремния	2200	745	1,38	$8,42 \cdot 10^{-7}$
Нитрид кремния	3000	700	15–30	$(7,14–14,28) \cdot 10^{-6}$

## 2.2 Интегральная микросхема и ее тепловая модель

На рисунке 2.1а приведена вертикальная структура элементов, формируемых в технологическом процессе. Назначение и параметры слоев приведены в таблице 2.2. Тепловая Модель 1 интегральной схемы (ИМС) представлена на рисунке 2.1б (структура модели зависит от типа конкретной ИМС и используется ниже в трехмерном моделировании). Упрощенная тепловая Модель 2 ИМС, показана на рисунке 2.1в и представляет собой однородный

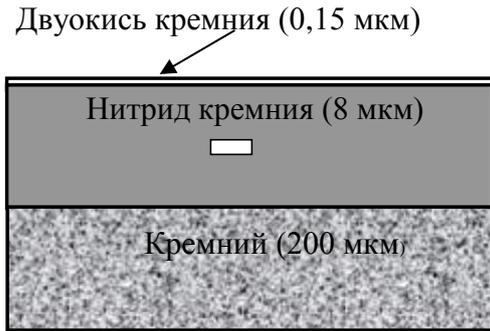
параллелепипед из нитрида кремния с внутренними источниками тепловыделения (используется в одномерном моделировании).

Таблица 2.2 – Назначение и параметры формируемых слоев в ИМС

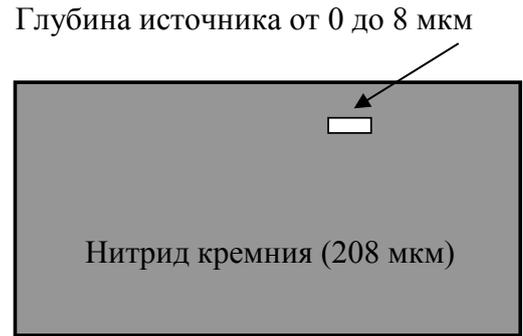
Наименование	Условное обозначение	Толщина, мкм	Тип проводимости	Поверхностное сопротивление, Ом·м
Области скрытого изолирующего окисла	H1	0,15	–	–
Области истока и стока n– и p-канальных транзисторов	H2	0,2	n <sup>+</sup> , p <sup>+</sup>	63±10 95±10
Области траншейной изоляции	H3	0,2	–	–
Области слоя подзатворного окисла	H4	0,0115±0,0005	–	–
Области силицидированного затвора	H5	0,26±0,02	–	9±5
Области 1-го изолирующего слоя между областями силицида титана над кремнием и 1-м уровнем металлизации	H6	1,0±0,1	–	–
Области 1-го изолирующего слоя между областями силицидного затвора и 1-м уровнем металлизации	H7	0,75±0,07	–	–
Области металлизации 1-го уровня	H8	0,7±0,1	–	0,09
Области 2-го изолирующего слоя между 1-м и 2-м уровнями металлизации	H9	1,0±0,1	–	–
Области металлизации 2-го уровня	H10	0,7±0,1	–	0,06
Области 3-го изолирующего слоя между 2-м и 3-м уровнями металлизации	H11	1,0±0,1	–	–



Модель 1



Модель 2



в)

Рисунок 2.1 Тепловая модель ИМС:  
 а – пример структуры ИМС; б – тепловая модель ИМС; в –  
 упрощенная тепловая модель ИМС

## 2.3 Аналитическая модель

### 2.3.1 Прямая задача моделирования

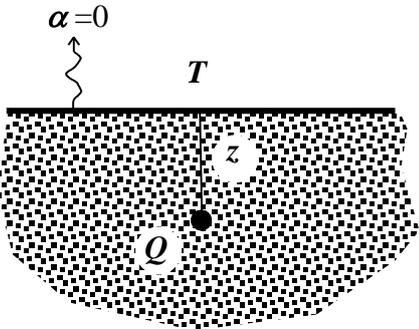
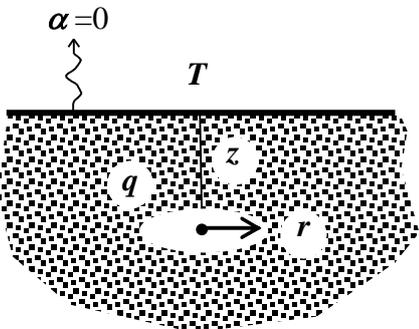
На основании имеющихся в литературе [56, 57] аналитических решений для бесконечного пространства, нами использованы малоизвестные аналитические формулы решения двух задач теплопроводности, имеющих прямое решение к исследуемой проблеме: точечный и дискообразный источник постоянного тепловыделения внутри адиабатического полупространства (Модель 2 на рисунке 2.1в, решения в таблице 2.3).

Важность полученных решений состоит в том, что они позволяют:

- 1) проверить точность численного решения 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.

Таблица 2.3 – Классические решения задач теории теплопроводности для точечного и дисковидного источников тепла, расположенных в адиабатическом полуограниченном теле

Модель теплового источника	Температура на поверхности
	$T = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{2\pi z} \Phi^* \left[ \frac{z}{\sqrt{4a\tau}} \right]; [Q]=Bm$ $\Phi^*(x) = 1 - \Phi(x);$ $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu - \text{функция ошибок}$ $\Phi^*(0) = 1, \text{ тогда в стационарном режиме}$ $T = \frac{Q}{\lambda} \frac{1}{2\pi z}$
	$T = \frac{2q\sqrt{a\tau}}{\lambda} \left\{ i\Phi^* \left[ \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right] - i\Phi^* \left[ \frac{\sqrt{z^2 + r^2}}{2\sqrt{a\tau}} \right] \right\};$ $T = \frac{2Q\sqrt{a\tau}}{\pi r^2 \lambda} \left\{ i\Phi^* \left[ \frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right] - i\Phi^* \left[ \frac{\sqrt{z^2 + r^2}}{2\sqrt{a\tau}} \right] \right\};$ $q = \frac{Q}{\pi r^2}; [q]=Bm/M^2 \text{ а)}$ $i\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x\Phi^*(x)$ <p>а) В этом случае полная мощность источника равна произведению поверхностной плотности мощности на площадь дисковидного источника (одной его поверхности).</p>
<p>Условные обозначения: <math>T</math> – температура на поверхности; <math>Q</math> – полная мощность источника; <math>\lambda</math> – теплопроводность материала; <math>z</math> – глубина залегания источника; <math>a</math> – температуропроводность материала; <math>\tau</math> – время; <math>\mu</math> – переменная в функции ошибок; <math>q</math> – поверхностная плотность мощности источника; <math>r</math> – радиус источника.</p>	

Наиболее простые соотношения получаются для случая точечного источника (см. таблицу 2.3). Изменение температуры на поверхности слоя из нитрида кремния показано на рисунке 2.2а. Для того же материала зависимость максимального температурного сигнала от глубины залегания и мощности источника в нитриде кремния дается соотношением:

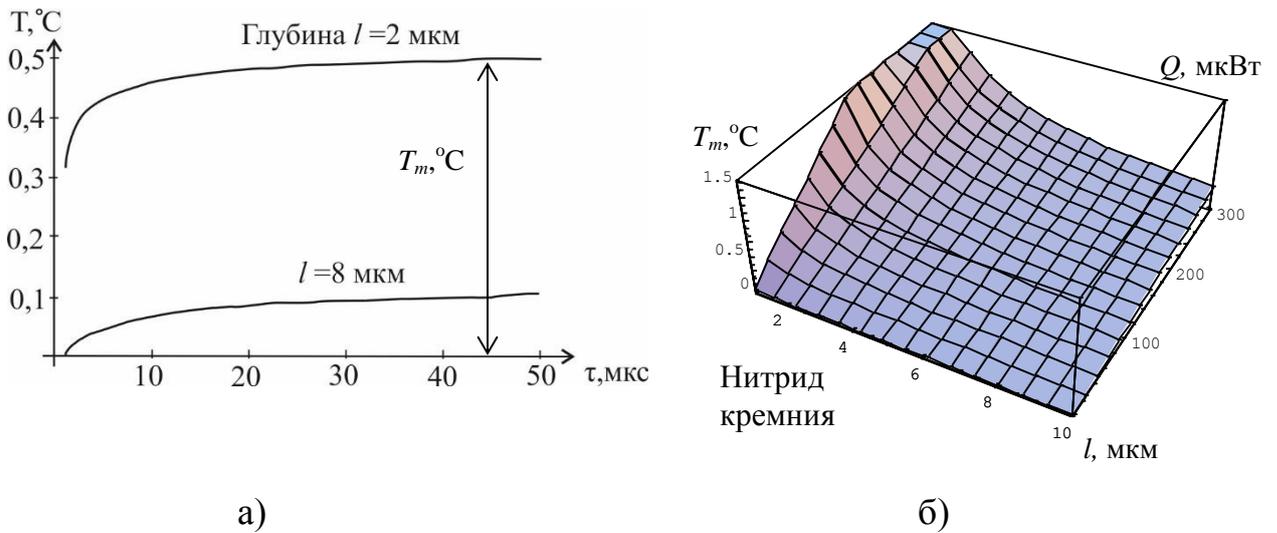


Рисунок 2.2 Температурные сигналы, генерируемые внутренними точечными источниками тепловыделения в ИС на базе нитрида кремния: а –  $T(\tau)$  для двух значений  $l$  и мощности 100 мкВт; б – формула (2.1)

$$T_m [^{\circ}\text{C}] = 0,0106 Q / l \quad (2.1)$$

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

Общий вид этой зависимости показан на рисунке 2.2б.

Если  $\Delta T_{res}$  – температурное разрешение ИК камеры, то предельные обнаруживаемые глубины и мощности источников связаны соотношением:

$$l = 0,0106 Q / \Delta T_{res} \quad (2.2)$$

График последней функции показан на рисунке 2.3 и иллюстрирует пределы обнаружения скрытых источников. Очевидно, что предложенная формула носит приближенный характер (предел обнаружения зависит от структуры и материалов конкретной ИМС, размеров источника, а также от помех процедуры контроля, которые требуют дополнительного изучения), и может использоваться для оценки порядка величин.

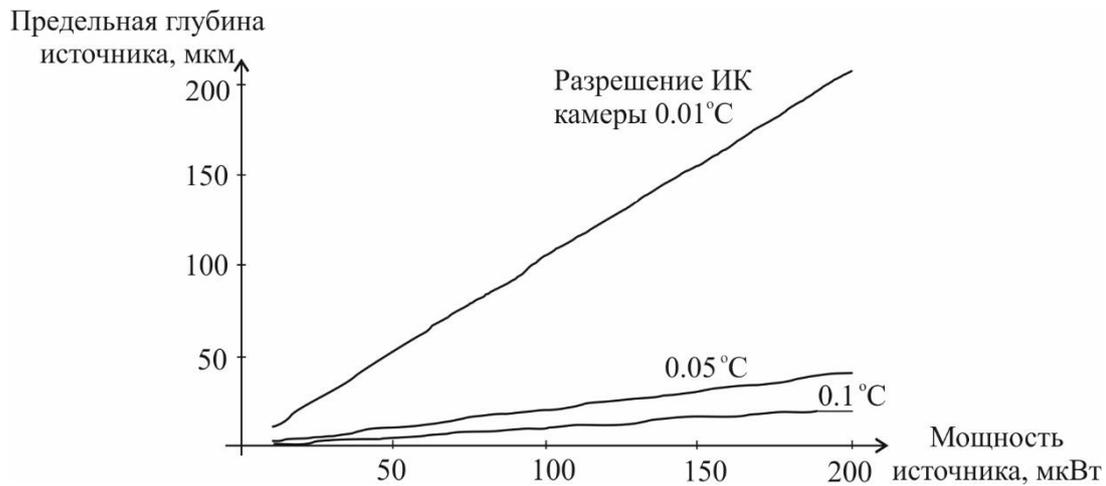


Рисунок 2.3 К определению пределов обнаружения скрытых источников тепловыделения в нитриде кремния

Как и следовало ожидать, источники конечных размеров производят мѣньшие сигналы, чем равный по мощности точечный источник. Соответствующая формула из таблицы 2.3 иллюстрируется графиками на рисунке 2.4, где показано изменение сигнала  $T(\tau)$  от времени при включении дискообразных источников размеров  $10 \times 10$  (рисунок 2.4а) и  $100 \times 100$  мкм (рисунок 2.4б).

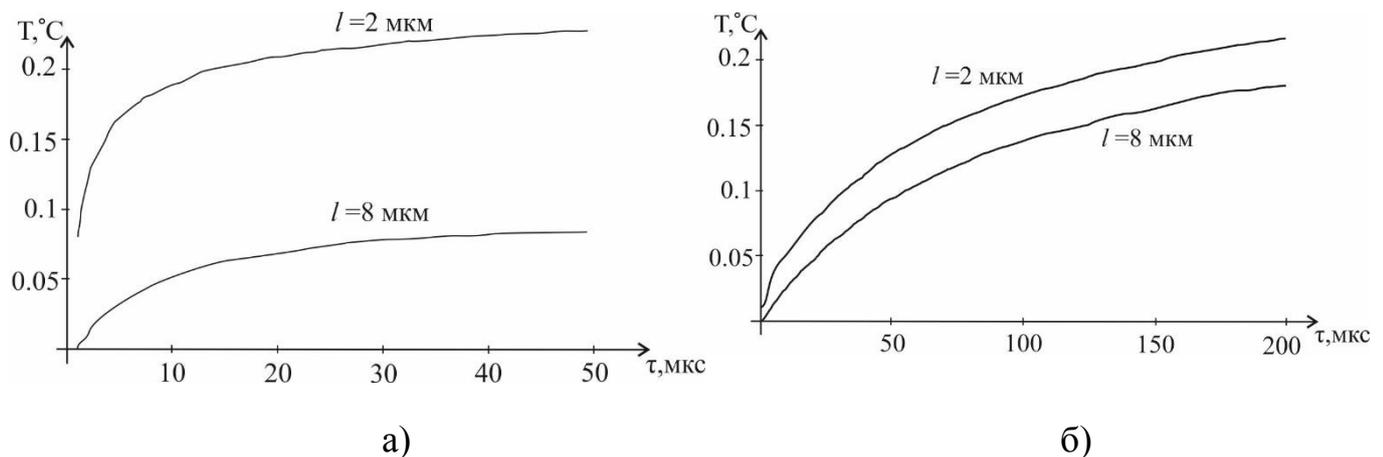


Рисунок 2.4 Температурные сигналы, генерируемые внутренними источниками тепловыделения конечного размера в ИМС на базе нитрида кремния:

а – источник размером  $10 \times 10$  мкм,  $Q=100$  мкВт; б – источник размером  $100 \times 100$  мкм,  $Q=100$  мкВт.

Из сравнения графиков рисунка 2.2.и рисунка 2.4 видно, что чем меньше источник, тем ближе генерируемые им температурные сигналы к случаю точечного источника.

Первым важным заключением из вышеприведенных графиков является то, что при включении источников на микрометровых глубинах стационарное значение достигается через микросекундные времена. Очевидно, что экспериментально этот процесс зарегистрировать не удастся, поскольку для этого частота записи изображений ИК камерой должна составлять от сотен кГц до единиц МГц (такие ИК камеры не созданы).

Второе важное заключение следует из первого. Из теории ТК известно, что оценка глубины дефектов по температуре связана с анализом характерных времен нарастания температуры и определяется также температуропроводностью материала. В нашем случае это, по-видимому, затруднительно из-за невозможности записать динамический процесс. Тем не менее, в разработанной программе ThermoProcessor реализована процедура определения мощности и глубины залегания источников на базе формул из таблицы 2.3.

### 2.3.2 Обратная задача дефектометрии

Следуя известному методу Паркера по измерению температуропроводности, предлагается измерять момент времени  $\tau_{0.5}$ , когда температура на поверхности достигает половины максимального значения. Используя определение функции ошибок и таблицу 2.3 можно показать, что для точечного источника этот момент времени наступает, когда  $\Phi(x) = 0.5$ , или  $x = z / \sqrt{4a\tau} = 0,4769$ . Таким образом, основной формулой для определения глубины залегания источника является:

$$z = 0,4769 \sqrt{4a\tau_{0.5}}. \quad (2.3)$$

Соответственно мощность источника может быть определена по избыточной температуре стационарного состояния  $T_{st}$ :

$$Q = 2\pi\lambda z T_{st}. \quad (2.4)$$

Формулы дефектометрии (2.3), (2.4) реализованы в программе ThermoSource.

Важно отметить, что структура решений в таблице 2.3 такова, что в стационарном режиме дефектометрия невозможна, поскольку температурный сигнал зависит от двух неизвестных параметров:  $Q$  и  $l$ . В лучшем случае возможна оценка отношения  $Q/l$ .

### 2.3.3 Численное решение трехмерной задачи

Вышеприведенные аналитические решения не учитывают:

- 1) наличия разнородных слоев в ИМС;
- 2) конфигурации источников;
- 3) конечной толщины объекта контроля;
- 4) наличия детерминированных и случайных шумов.

Все эти проблемы решаются численно с помощью разработанного программного обеспечения ThermoSource.

Физически решение сводится к расчету нестационарного температурного поля над источниками произвольной (но прямоугольной) конфигурации, расположенными в слоях 6-слойной пластины. Математическая постановка приведена в описании программы ThermoSource.

Для иллюстрации точности решения на рисунке 2.5 показаны графики изменения температуры над источником в нитриде кремния на глубине 10 мкм; проведено сравнение аналитического решения для точечного источника (рисунок 2.5а), аналитического решения для дискообразного источника площадью 9 мкм<sup>2</sup> (рисунок 2.5б), а также численного решения для источника в виде параллелепипеда размером 3×3×0.5 мкм<sup>3</sup> (рисунок 2.5в). Видно, что расхождение в значениях температуры не превышает 15% (максимальная температура над источником во всех случаях составляла около 0,1°С), что допустимо в теплофизических практических расчетах; следовательно, такой источник может рассматриваться как точечный.

Наиболее важной проблемой, которая может быть проанализирована с помощью программы ThermoSource, является учет шумов, что позволяет разработать алгоритмы их подавления.

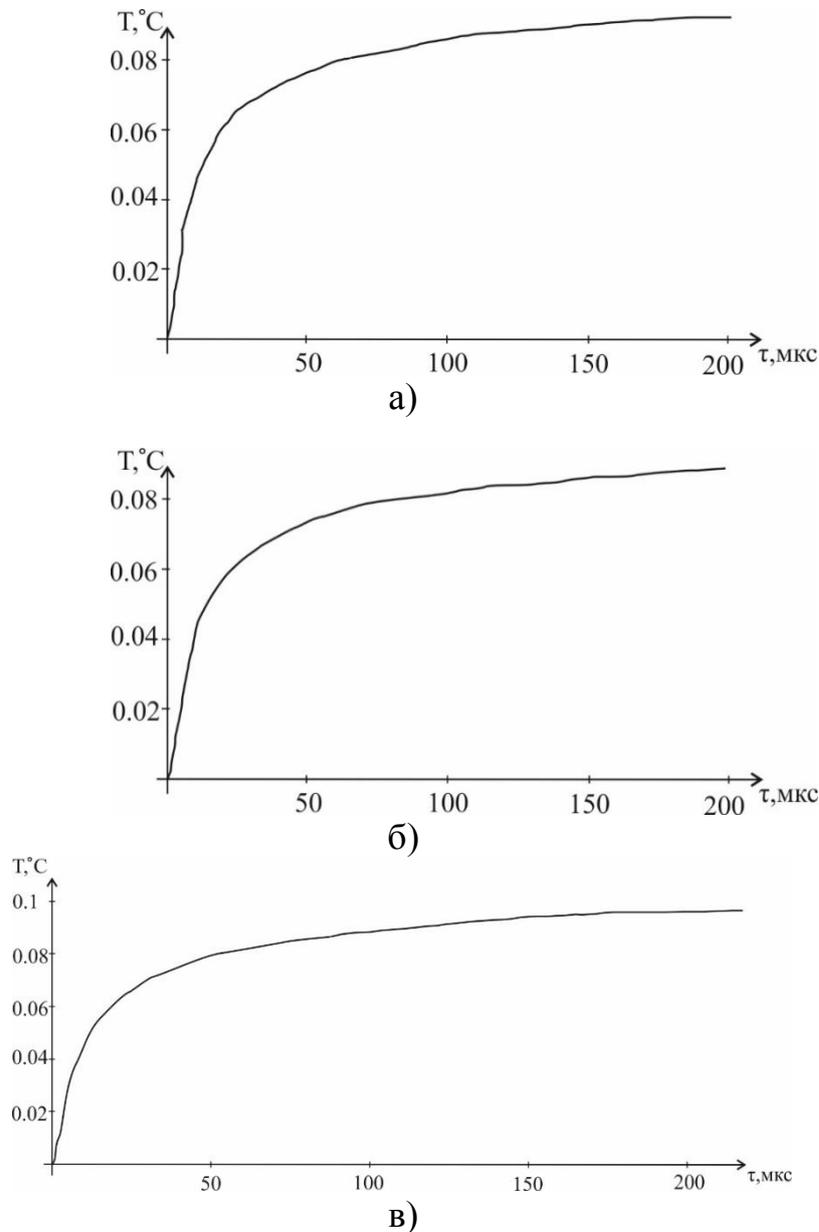


Рисунок 2.5 Сравнение аналитических и численного решения для источника в нитриде кремния мощностью 100 мкВт на глубине 10 мкм:

а – аналитическое решение для точечного источника;

б – аналитическое решение для дискообразного источника площадью 9 мкм<sup>2</sup> и нулевой толщины;  $T(\tau = 200 \text{ мкс}) = 0,0896^\circ\text{C}$ ;

в – численное решение для источника в виде параллелепипеда размером  $3 \times 3 \times 0.5 \text{ мкм}^3$ ;  $T(\tau = 200 \text{ мкс}) = 0,102^\circ\text{C}$ ; получено программой ThermoSource

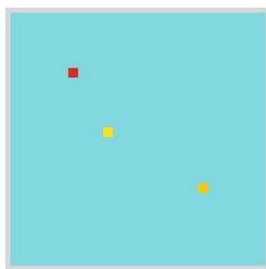
Возможны 2 вида шума: 1) детерминированные (обусловлены структурой ИМС, что ведет к изменениям коэффициента излучения, а также внешними

аддитивными помехами); 2) случайные (шумы приемника). Оба вида шумов могут быть проанализированы с помощью ThermoSource.

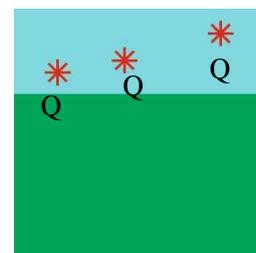
Пакет ThermoSource содержит два демо-сценария (Microcircuit model without noise.tcl и Microcircuit model with noise.tcl), которые иллюстрируют расчет задачи нагрева многослойной открытой микросхемы 3-мя внутренними источниками тепла. Микросхема моделируется трехслойной структурой, состоящей из верхнего слоя толщиной 0,15 мкм из двуокиси кремния, активного слоя толщиной 8 мкм из нитрида кремния и подложки толщиной 200 мкм из кремния. Источники тепла имеют вид тонких квадратных параллелепипедов размером  $10 \times 10 \times 2$  мкм с общей мощностью тепловыделения 100 мкВт (при этом плотность мощности составляет  $5 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>3</sup>), расположенных на глубинах 2, 4 и 6 мкм в нитриде кремния. Примеры рассчитанных термоизображений показаны на рисунке 2.6.

Сценарий Microcircuit model without noise.tcl описывает включение «чистых» источников (без шумов), тогда как в сценарий Microcircuit model with noise.tcl) введены как детерминированные шумы в виде поверхностной структуры ИС, так и случайные шумы детектора излучения со стандартным отклонением  $0,0033^\circ\text{C}$ , что моделирует высококачественный детектор ИК излучения с температурным разрешением  $\Delta T_{res} = 0.01^\circ\text{C}$ .

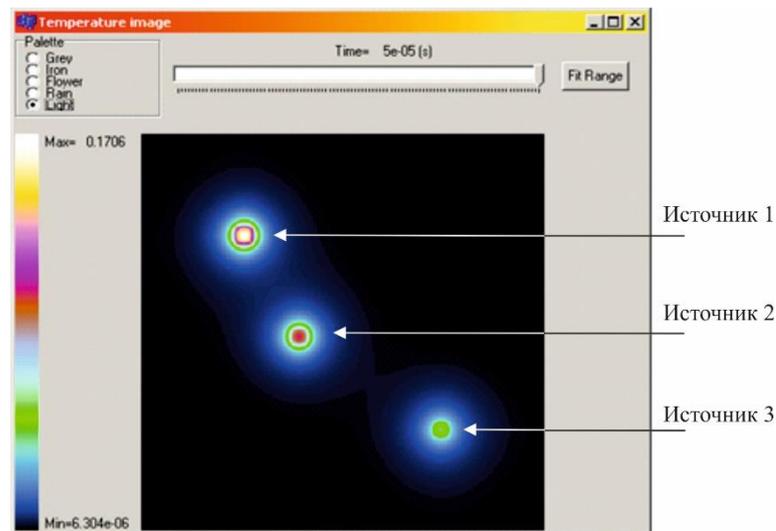
Важной чертой программы ThermoSource является возможность рассчитывать и сохранять последовательности ИК изображений, которые моделируют экспериментальные последовательности.



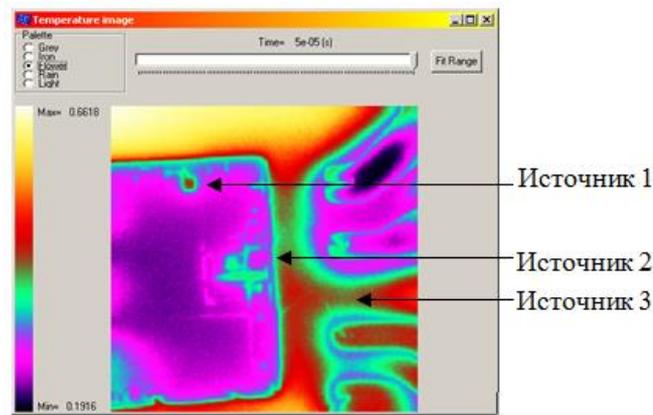
Вид на ИМС сверху



Вид сбоку (нагрев снизу)



Сценарий «Microcircuit model without noise.tcl»



Сценарий «Microcircuit model with noise.tcl»

Рисунок 2.6 Модель источников тепловыделения и термоизображения, иллюстрирующие сценарии Microcircuit model without noise.tcl и Microcircuit model with noise.tcl

## 2.4 Обработка экспериментальных ИК изображений

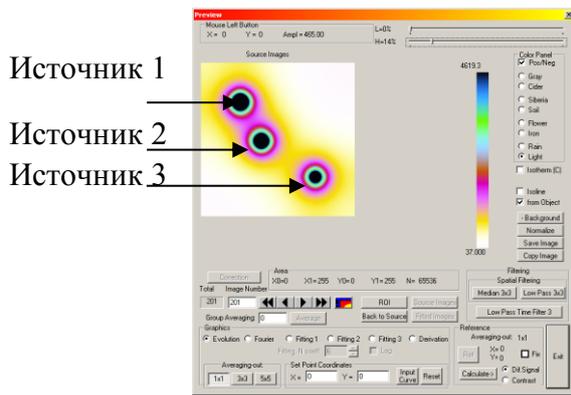
Обработка ИК изображений, в основном, основана на анализе динамики температурных процессов (здесь основной проблемой является, как отмечено выше, слишком большая скорость изменения температуры над источниками, расположенными на микрометровых глубинах). Разработано программное обеспечение ThermoFit Pro, в котором реализованы разнообразные алгоритмы обработки ИК термограмм:

- стандартные процедуры обработки отдельных ИК изображений (фильтрация, вычитание, усреднение и т.д.);

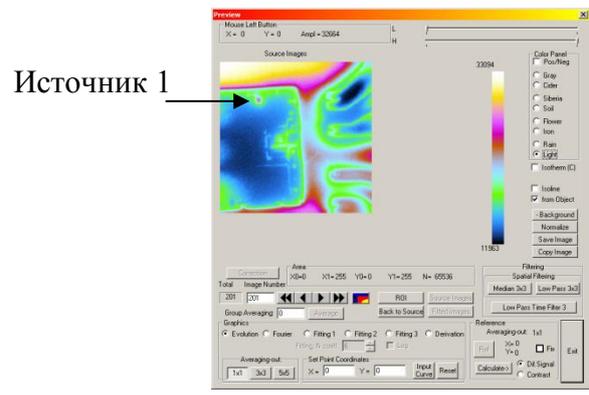
- специализированные процедуры обработки динамических последовательностей ИК изображений (нормализация, построение максиграмм и таймограмм, Фурье анализ, полиномиальная аппроксимация, анализ главных компонент, анализ производных, дефектометрия скрытых источников и определение теплофизических характеристик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

#### Демо-сценарии MicroprocessorModel.sce и Microprocessor.sce

К разработанной программе ThermoSource прилагаются две последовательности изображений и соответственно два сценария: MicroprocessorModel.sce и Microprocessor.sce. Оба сценария описывают решение одной и той же физической задачи обнаружения источников тепловыделения в бескорпусных микросхемах. Микросхема является трехслойной структурой, состоящей из верхнего слоя толщиной 0,15 мкм из двуокиси кремния, активного слоя толщиной 8 мкм из нитрида кремния и подложки толщиной 200 мкм из кремния. Источники тепла имеют вид тонких квадратных параллелепипедов размером  $10 \times 10 \times 2$  мкм с общей мощностью тепловыделения 100 мкВт (при этом плотность мощности составляет  $5 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>3</sup>), расположенных на глубинах 2, 4 и 6 мкм в нитриде кремния. Различие между сценариями состоит в том, что сценарий MicroprocessorModel.sce представляет собой задачу расчета нагрева внутренними источниками однородных материалов без наличия детерминированных (поверхностных) и случайных шумов (рисунок 2.7, слева), тогда как сценарий Microprocessor.sce включает шумы поверхности в виде реальной инфракрасной термограммы бескорпусной микросхемы (рисунок 2.7, справа), а также случайные шумы фотоприемника со стандартным отклонением  $0,033^\circ\text{C}$  (при этом случайный шум описывается гауссовским распределением с шумовым отклонением температуры  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ ).



Сценарий MicroprocessorModel.sce



Сценарий Microprocessor.sce

## Рисунок 2.7 Демо-сценарии в программе ThermoSource

### Фурье-анализ (импульсная фазовая термография)

Примеры Фурье-обработки для демо-последовательности показаны на рисунке 2.8. Известно, что фазограммы менее чувствительны к шумам и улучшают «видность» источников.

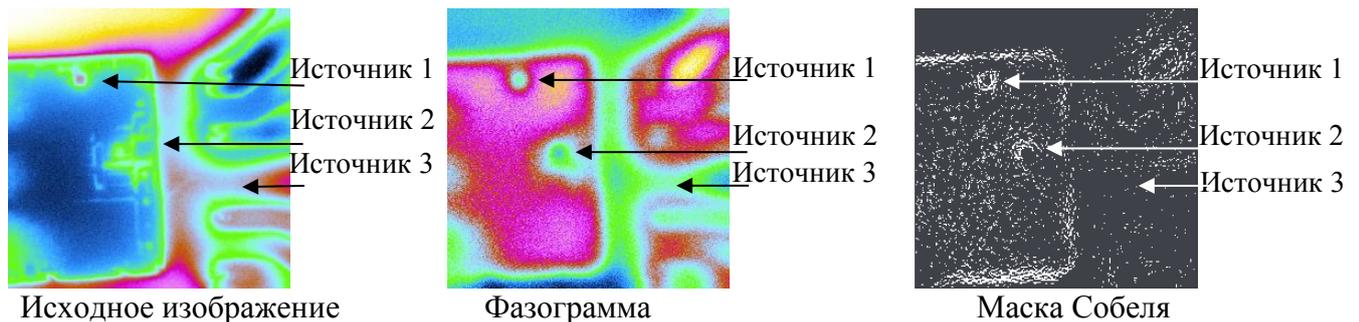


Рисунок 2.8 Применяя преобразование Фурье к демо-последовательности Microprocessor.sce

### Полиномиальная аппроксимация

Изображения 1-го и 2-го полиномиальных коэффициентов приведены на рисунке 2.9. Видно, что в изображении 2-го коэффициента обнаруживаются Источники 1, 2, тогда как Источник 3 не выявляется.

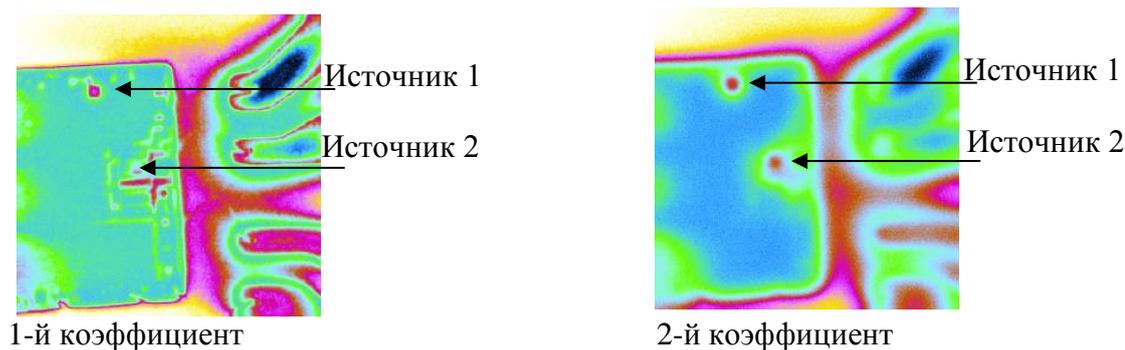


Рисунок 2.9 Изображения полиномиальных коэффициентов при аппроксимации последовательности в сценарии `Microprocessor.sce`

### Метод главных компонент (PCA)

Примеры получаемых при этой операции изображений главных компонент показаны на рисунке 2.10. Приемлемое обнаружение всех трех источников обеспечивает 4-я компонента (рисунок 2.10, справа). В целом, насколько известно, данный метод был впервые использован для нужд ТК в Томском политехническом университете. Предварительные результаты показали, что он является многообещающим и заслуживает дальнейшего изучения.

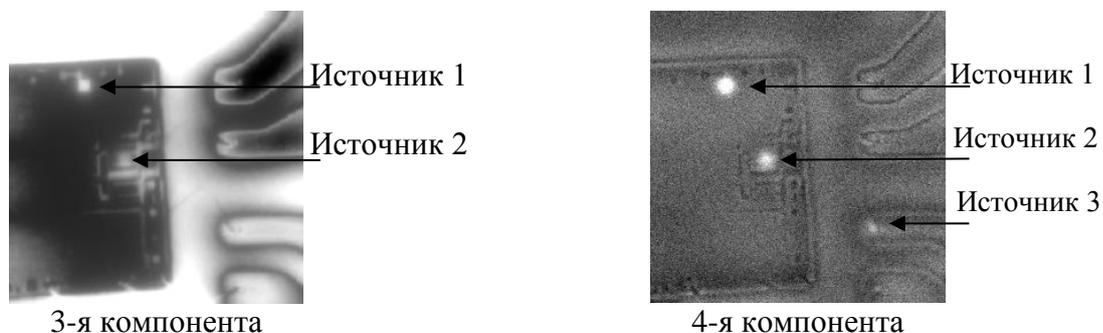


Рисунок 2.10 Изображения главных компонент последовательности в сценарии `Microprocessor.sce` при использовании метода PCA

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis – PCA) является полезной статистической процедурой, которая в последнее время приобретает все большее распространение в задачах распознавания образов и сжатия данных, в частности, при очень больших объемах анализируемых данных.

Метод применим к статистически распределенным данным с нулевым средним значением. Его сущность состоит в вычислении ковариационной матрицы исходных данных, а также собственных единичных векторов (eigenvectors) и собственных значений (eigenvalues) этой матрицы. Собственные вектора располагают в порядке их значений по порядку от высшего к низшему, что дает компоненты статистического набора в порядке убывания их значимости. Пренебрегая низшими компонентами, можно понизить метрику задачи, например, исключить влияние конвективной теплоотдачи при анализе металлических изделий, если используется многомерная тепловая модель, в которой присутствует конвекция. Выбирая из полученного списка собственных векторов наиболее значимые, получают вектор характеристик (feature vector), который представляет собой матрицу, состоящую из столбца собственных векторов.

Наконец, умножая транспонированный вектор характеристик на вектор исходных данных, можно получить новый набор, выраженный в терминах тех собственных векторов, которые признаны значимыми.

В рамках метода главных компонент возможна реализация различных подходов к обработке исходных данных. Статистическая связь точек исследуемого множества во времени также может быть выполнена различными способами. В Программе использованы три способа: 1) корреляция (корреляционная зависимость между точками); 2) ковариация («расстояние» между точками); 3) квадратичные суммы (как промежуточный этап при подготовке данных для первых двух способов).

Суммируя вышесказанное, можно сказать, что метод главных компонент позволяет свести последовательность ИК изображений, какой бы длинной она ни была, к нескольким изображениям главных компонент (см., например, рисунок 2.10), причем предполагается, что каждая из компонент преимущественно содержит статистически значимые характеристики последовательности, например, зоны неравномерного нагрева, поверхностные шумы, скрытые дефекты и т.п. Тем не менее, важно заметить, что применение этого метода, в частности, в неразрушающем контроле, неформализовано и скорее

является искусством, нежели стандартной процедурой. Иными словами, наибольшей проблемой использования метода является проблема выбора заранее именно той главной компоненты, которая наиболее значима для Пользователя. В то же время важным преимуществом метода является «автоматический» характер его применения (подобно фазовому анализу). Иными словами, главные компоненты можно формировать из любой последовательности изображений без знания их физической природы и предварительной подготовки данных.

### Тепловая томография и корреляционный анализ

Применение метода тепловой томографии для анализа описываемых демо-последовательностей неэффективно ввиду однотипного поведения температуры во всех точках.

Определенные результаты дает корреляционный анализ, если в качестве эталонной выбрать точку на корпусе микросхемы.

Пример коррелограммы изображен на рисунке 2.11.

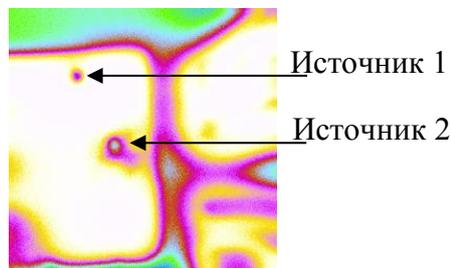


Рисунок 2.11 Коррелограмма (сценарий Microprocessor.sce)

### Тепловая дефектometрия внутренних источников тепловыделения

Для оценки параметров скрытых источников тепла необходимо знать временные параметры теплового процесса (введены в сценарии) и максимальные избыточные сигналы  $\Delta T_m = T_{st}$  в центре обнаруженных источников. Программа ThermoSource не позволяет считывать истинные температуры, поскольку работает с байтовыми изображениями. Поэтому вышеуказанные сигналы следует записать из эксперимента. В случае демо-последовательности MicrocircuitModel.sce эти сигналы были рассчитаны с помощью программы ThermoSource:

$\Delta T_m = 0,173^{\circ}\text{C}$  для Источника 1 (расчетная мощность источника 100 мкВт, глубина 2 мкм, размер  $10 \times 10$  мкм);

$\Delta T_m = 0,105^{\circ}\text{C}$  для Источника 2 (расчетная мощность источника 100 мкВт, глубина 4 мкм, размер  $10 \times 10$  мкм);

$\Delta T_m = 0,056^{\circ}\text{C}$  для Источника 3 (расчетная мощность источника 100 мкВт, глубина 6 мкм, размер  $10 \times 10$  мкм).

Используя «дефектометрическую» опцию программы ThermoSource (рисунок 2.12), размеры источников были определены на уровне 10 и 11 мкм (сравнить с истинными размерами 10 мкм).

Вводя для Источника 1  $\Delta T_m = 0,173^{\circ}\text{C}$ , получим глубину залегания источника 3.1 мкм (сравнить с истинной глубиной 2 мкм) и мощность 51 мкВт (сравнить с истинной 100 мкВт). Для двух других источников соответственно получим 3.6 мкм и 59 мкВт (Источник 2) и 4.4 мкм и 23 мкВт (Источник 3).

Следовательно, использованный алгоритм по формулам (3, 4) обеспечивает лишь приближенную оценку глубины залегания и мощности источника.

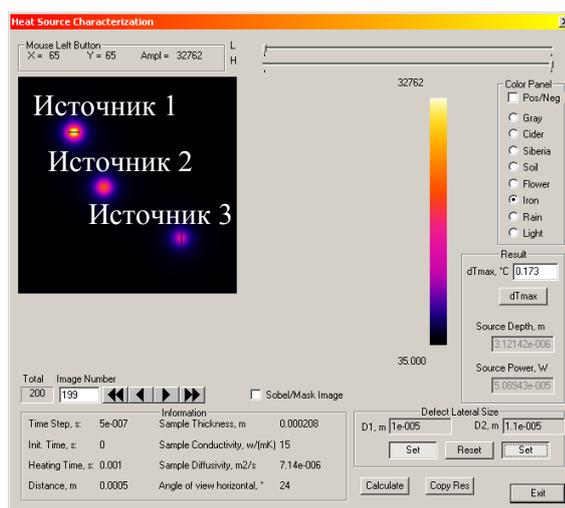


Рисунок 2.12 Обработка сценария MicrocircuitModel.tcl в окне «Дефектометрия источника» программы ThermoProcessor

Погрешность определения параметров источника в данном случае обусловлена тем, что источники достаточно большого поперечного размера (по сравнению с глубиной их залегания) сведены к точечным источникам.

### Статистический анализ

При статистическом анализе часто используют понятие сигнал/шум SNR.

$$SNR = \frac{|\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}|}{\sigma_{nd}},$$

где  $\bar{T}_d$ ,  $\bar{T}_{nd}$  – средние температуры в дефектной и бездефектной областях,  $\sigma_{nd}$  – среднеквадратичное отклонение температуры в бездефектной области, рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{nd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2},$$

где  $n$  – количество пикселей в выбранной области,  $T_i$  – значение температуры в каждом пикселе,  $\bar{T}$  – среднее значение температуры в выбранной области). Данный феномен связан с неоднородностью температур контролируемого материала в бездефектной области, что обусловлено наличием как мультипликативных, так и аддитивных тепловых помех. Очевидно, что величина  $\sigma_{nd}$  зависит от размера выбранной бездефектной зоны; например, она может быть весьма большой в случае неравномерного нагрева или разнотолщинности объекта контроля.

Окно статистики Statistics программы ThermoFit Pro позволяет рассчитать этот параметр для выбранных Пользователем дефектных и бездефектных областей в каждом отдельном изображении.

Дефектную область, занятую, например Источником 1, можно сравнить с бездефектной областью, размеры которой могут быть малыми (рисунок 2.13, слева) или большими (рисунок 2.13, справа). Для выбранных областей можно построить изменение отношения сигнал шум SNR во времени (см. графики на рисунке 2.13).

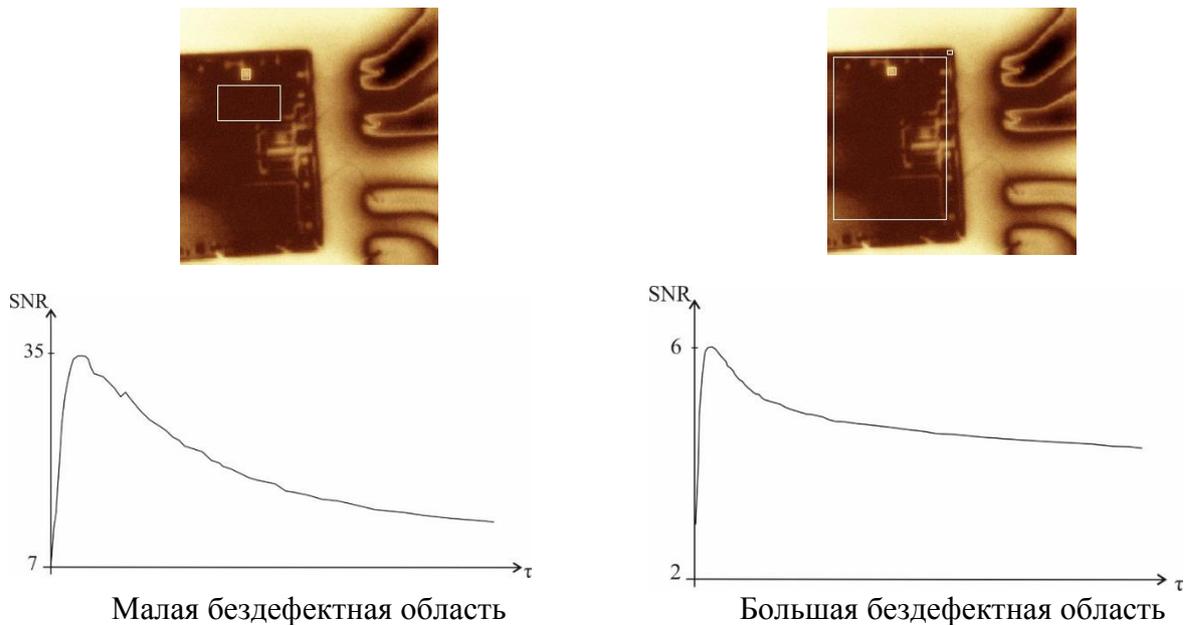


Рисунок 2.13 Выбор областей в окне «Статистика» программы ThermoProcessor и построение зависимости отношения сигнал/шум от времени наблюдения

При малой бездефектной области (слева) максимальное значение  $SNR=35,3$ , при большой бездефектной области (справа) максимальное значение  $SNR$  снижается до  $6,21$ .

## 2.5 Выводы по Главе 2

- 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 микросхемах; 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.

### **ГЛАВА 3 УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА**

В настоящей главе изложен подход к оценке нестационарных температурных режимов различных элементов радиоэлектроники, используемый в Лаборатории теплового контроля ТПУ и описанный как в работах автора, так и других сотрудников лаборатории [58–68].

#### **3.1 Обоснование необходимости исследований**

В данной главе рассмотрены теплофизические аспекты анализа переходных режимов в телах простой геометрии. Следует подчеркнуть, что речь идет об аналитических решениях, которые, в принципе, фундаментально проработаны и суммированы, например, в работах H.S. Carslow и T.S. Jaeger за рубежом и А.В. Лыкова в бывшем СССР. Тем не менее, многие классические решения весьма громоздки, поскольку они включают бесконечные ряды и требуют нахождения корней трансцендентных уравнений. Однако для нужд ТК зачастую достаточными являются приближенные оценки, которые позволяют спрогнозировать ожидаемые температурные сигналы и оптимальные времена их регистрации. Ряд таких простых решений получены в настоящем исследовании. Определенный акцент в данной главе сделан на анализ тепловых режимов бетатронов, в разработке которых мировой приоритет принадлежит Томскому политехническому университету.

В [69–77] приведены обзоры литературы по устройству, нагреву и охлаждению активных элементов электрофизических установок. В обзорах подробно дан анализ состояния и развития одному из самых распространенных электронных ускорителей – бетатрону [64, 70, 78–84], в котором для ускорения движения электронов по круговой орбите используют электрическое поле, индуктированное изменяющимся во времени магнитным потоком. Первый действующий бетатрон был построен в 1940 г. американцем Д.В. Керстом [65, 85–89]. В настоящее время разрабатываемые и применяемые бетатроны, согласно

классификации [77,85, 90–93], с тепловой точки зрения условно подразделяются на три группы. Нас интересуют переносные малогабаритные бетатроны на энергию 3 – 9 МэВ с относительно невысокой мощностью дозы излучения. Эти бетатроны используются для самых разнообразных целей в нестационарных условиях эксплуатации и сравнительно малой массы до 100 кг на энергию 6 МэВ. Достигнутые под руководством В.Л. Чахлова успехи в создании малогабаритных бетатронов [66, 94-98] позволили Томскому политехническому университету занять значительный сегмент рынка установок для радиографии во многих странах Запада и Ближнего Востока.

В настоящее время в связи с разработкой новых и усовершенствования существующих малогабаритных бетатронов возникла проблема отвода тепла от наиболее нагруженных в тепловом отношении центральных вкладышей, которые окружены ускорительной камерой. Электромагнит бетатрона состоит из обмотки с охлаждающими каналами и магнитопровода, набираемого в виде шихтованного пакета из листов электротехнической стали. Практически не решены вопросы влияния числа охлаждающих каналов в обмотке на малогабаритные размеры электромагнита, на его тепловое состояние, на выбор вентилятора [59,60,63].

Для решения этих вопросов необходимо численное моделирование на основе сформулированной обобщенной математической модели нестационарного теплообмена, которая позволила бы практически решать задачи активного ТК изделий радиоэлектроники, в частности, теплонагруженных узлов бетатронов.

Аналитический подход основан на использовании классических теплофизических решений, приведенных, например, в широко известных монографиях Carslow H.S. и Jaeger T.S. [56], а также А.В. Лыкова [57]. Многие из этих решений содержат бесконечные ряды и требуют расчета сложных трансцендентных уравнений. В тоже время отдельные фазы тепловых переходных процессов в электронных изделиях, аппроксимируемых телами простой геометрической формы – пластиной, цилиндром, сферой – могут быть описаны гораздо более простыми аналитическими выражениями, которые получены нами в настоящей главе.

### 3.2 Приближенные методы оценки теплового состояния элементов при малых ( $Fo < 0,02$ ) числах Фурье

Многие задачи уравнений математической физики могут быть решены методом разделения переменных (методом Фурье). Поэтому в последние годы в литературе уделяется особое внимание разработке приближенных аналитических методов решения краевых задач, для которых применим метод Фурье. При этом следует согласиться с мнением авторов [99], что «при усложнении дифференциального уравнения или краевых условий, или геометрии тела сложности использования метода Фурье настолько возрастают, что во многих случаях он оказывается практически неприменим».

В основе предложенных методов [99, 100] лежит методика определения собственных значений краевой задачи Штурма-Лиувилля, которая не может быть применена для уравнений практически любой сложности при малых числах  $Fo < 0,005$ . В этом можно убедиться на примерах, приведенных в [99, 100].

Ниже рассмотрены два приближенных аналитических метода для оценки температурного поля в элементе без применения специальных функций (Бесселя, ошибок Гаусса, полиномов Лежандра и др.).

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

Ниже изложена методика, основанная на использовании так называемых, датчиков теплового потока [58–61, 101]:

$$q = \rho c \delta \frac{d\vartheta}{d\tau}. \quad (3.1)$$

Рассматривается классическая постановка задачи нестационарного теплообмена для неограниченной пластины:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 < x < R; \\ \vartheta(x, 0) &= \vartheta_0, \quad \frac{\partial \vartheta(0, x)}{\partial x} = 0, \quad \vartheta(R, \tau) = 0, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\mathcal{G}(x, \tau) = T - T_{cm}$  – избыточная температура;  $T_{cm}$  – температура стенки при  $x = R$ ;  $T_0$  – начальная температура,  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Для малых моментов времени, применяя зависимость (3.1) к уравнению (3.2), получим:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} \right). \quad (3.3)$$

Примем для характерного линейного масштаба  $\delta$  зависимость

$$\delta \approx \sqrt{a\tau}. \quad (3.4)$$

Тогда уравнение (3.3), как уравнение с разделяющимися переменными, поддается непосредственному решению.

Окончательно приближенное решение имеет вид:

$$\mathcal{G}(x, \tau) = \mathcal{G}_0 \left[ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{R-x}{\delta} \right) \right] \right] \quad (3.5)$$

или в безразмерной форме:

$$\theta(X, Fo) = \frac{\mathcal{G}(x, \tau)}{\mathcal{G}_0} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{1-X}{\sqrt{Fo}} \right) \right], \quad (3.6)$$

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

Для плотности теплового потока, согласно закону Фурье, учитывая зависимость (3.4), имеем:

$$q = -\lambda \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x} = \frac{\lambda}{\delta} \mathcal{G}_0 \exp \left[ - \frac{(R-x)}{\delta} \right] = \frac{\lambda}{\delta} \mathcal{G}_0 [1 - \theta(x, Fo)],$$

следовательно, используя выражения (3.5), (3.6), приходим к:

$$q = \sqrt{\frac{\lambda c \rho}{\tau}} [T_0 - T(x, \tau)]. \quad (3.7)$$

Решение (3.6), как нетрудно убедиться, удовлетворяет предельным случаям:

$$\begin{aligned} &\text{при } X < 1 \text{ и } Fo \rightarrow \infty \quad \theta(X, Fo) \rightarrow 0; \\ &X = 1 \quad \theta(X, Fo) \rightarrow 0; \text{ при } X < 1, Fo \rightarrow 0 \quad \theta(X, Fo) \rightarrow 1. \end{aligned}$$

Сравнение результатов расчета для неограниченной пластины с использованием точного решения данной задачи (см. формулы (25) и (29) в работе [57]) и уравнения (3.6) приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1– Результаты расчета температуры в центре неограниченной пластины ( $X=0$ )

Fo	Точное решение [57] $\theta$	Расчет по формуле (3.6)	Погрешность расчета $\varepsilon, \%$
0,001	1,000	1,000	0,0
0,004	1,000	1,000	0,0
0,010	1,000	1,000	0,0
0,020	1,000	0,999	0,1
0,040	0,9992	0,993	0,62
0,050	0,9969	0,989	0,79
0,060	0,9922	0,983	0,93
0,080	0,9752	0,971	0,43
0,1	0,9493	0,958	-0,95
0,2	0,7723	0,893	-15,63

### 3.3 Приближенные методы оценки теплового состояния элементов при больших ( $Fo > 0,1$ ) числах Фурье

Для решения задачи использован метод интегральных преобразований [102, 103], при реализации которого ядро интегрального преобразования определяется приближенно в результате решения вспомогательной задачи (метод решения предложен В.С. Логиновым, ТПУ):

$$\frac{d^2G}{dX^2} = -\mu^2, \text{ при } X = 0 \quad \frac{dG}{dX} = 0; \text{ при } X = 1 \quad G = 0.$$

Решение дифференциального уравнения при заданных граничных условиях имеет вид:

$$G(X) = \frac{\mu^2}{2}(1 - X^2).$$

Вычислим интегралы:

$$\int_0^1 G(X) dX = \frac{\mu^2}{3},$$

$$\int_0^1 G^2(X) dX = \frac{2}{15} \mu^4.$$

Предположим, что имеет место соотношение [104]

$$\frac{\int_0^1 G(X) dX}{\int_0^1 G^2(X) dX} = 1.$$

После подстановки в это соотношение найденных значений интегралов находим  $\mu = 1,5811$ . Оно отличается от точного первого собственного числа [57]  $\mu_1 = \pi / 2$  на 0,66%.

Умножая левую и правую части уравнения энергии

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad (3.8)$$

на  $G(X)dX$  и выполняя интегрирование в пределах изменения  $X$  от 0 до 1, после несложных преобразований получим:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dFo} = -\mu^2 \bar{\theta}, \quad (3.9)$$

где  $\bar{\theta}(Fo) = \int_0^1 \theta(X, Fo) \cdot G(X) dX.$

Начальное условие для уравнения (3.9):

$$\bar{\theta}(0) = \int_0^1 1 \cdot G(X) dX = \frac{\mu^2}{3}.$$

Решение уравнения (3.9) с учетом начального условия имеет вид:

$$\bar{\theta}(Fo) = \frac{\mu^2}{3} \cdot \exp(-\mu^2 Fo).$$

Обратный переход от изображения к оригиналу дает:

$$\theta(X, Fo) = \frac{\mu^2}{2} (1 - X^2) \exp(-\mu^2 Fo). \quad (3.10)$$

Точное аналитическое решение задачи о нестационарном теплообмене для неограниченной пластины (3.2) выражено формулой (16) в работе [103]:

$$\theta_{\text{точн}} = \sum_{n=1}^{40} \frac{2}{(2n-1)\frac{\pi}{2}} (-1)^{n+1} \cdot \cos\left[(2n-1)\frac{\pi}{2} X\right] \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2}{4} Fo\right]. \quad (3.11)$$

На рисунке 3.1 дано сравнение значений температур рассчитанных по приближенным формулам (3.6), (3.10) и аналитической формуле (3.11) для различных чисел Фурье [104].

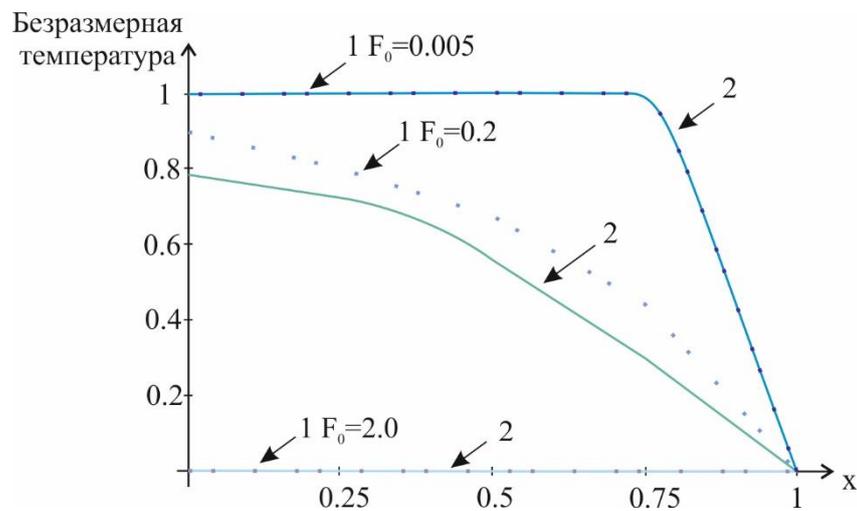


Рисунок 3.1 Сравнение величин безразмерной температуры, вычисленных по «точной» аналитической формуле (3.10) и по приближенным формулам (3.6), (3.10):

1– расчет по формулам (3.6), (3.10); 2– расчет по формуле (3.110)

В таблице 3.2 представлено сравнение «точных» значений температур, определенных по [57], а также рассчитанных по формуле (3.10). Максимальная погрешность расчета не превышает 9% при  $Fo \geq 2$ .

На основе известных в литературе классических методов решения задач теплопроводности предложен простой приближенный метод расчета температурного поля в элементе для малых чисел  $Fo < 0,02$  с погрешностью 0,1%. На примере импульсного термогенератора [103] в работе [68] данным методом получены точные зависимости. Следует заметить, что для чисел  $Fo < 0,003$  потребовалось бы не менее 40 собственных чисел при использовании точного

аналитического решения, что представляет значительные вычислительные трудности.

Таблица 3.2 – Результаты расчета температуры в центре неограниченной пластины ( $X=0$ ) при числах Фурье  $0,1 < Fo < 2,0$

Fo	Точное решение [57] $\theta$	Расчет по формуле (3.10)	Погрешность расчета $\varepsilon, \%$
0,1	0,949	0,974	-2,60
0,2	0,772	0,758	1,85
0,4	0,475	0,460	3,06
0,6	0,288	0,279	3,70
1,0	0,108	0,103	4,63
2,0	0,0092	0,0084	8,70
2,5	0,0026	0,0024	7,69

Для больших чисел  $Fo > 0,1$ , предложен приближенный метод конечных интегральных преобразований, в основе которого использован метод Кошлякова-Гринберга [62]. Предлагаемый метод является развитием известных работ А.А. Акаева – Г.Н. Дульнева и П.В.Цоя [104, 105]. В предельном случае при  $Fo \geq 2$  максимальная погрешность расчета температур по отношению к точным значениям не превышает 9%.

Практическая реализация предложенных методов не требует разработки пакета прикладных программ для современных средств вычислительной техники.

### 3.4 Выводы по Главе 3

- В третьей главе рассмотрен аналитический подход к ряду известных теплофизических решений с целью получения приближенных выражений для оценки параметров переходных тепловых процессов. Классические решения содержат бесконечные ряды и требуют определения корней сложных трансцендентных уравнений. В тоже время отдельные фазы тепловых переходных процессов в электронных изделиях, аппроксимируемых телами простой

геометрической формы – пластиной, цилиндром, сферой – могут быть описаны гораздо более простыми аналитическими выражениями, которые получены в настоящем исследовании без применения аппарата специальных функций.

- Разработана методика, 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.

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

## ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА БЛОКОВ ПИТАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕТАТРОНОВ

### 4.1. Краткое описание объекта исследования

Томский политехнический университет является мировым лидером в области разработки и применения малогабаритных бетатронов – портативных источников рентгеновского излучения для радиационного контроля и электронов для интраоперационной терапии [106, 107]. Качество работы бетатронов зависит от настройки параметров блоков питания, задающих режимы работы ускорителей. Бетатроны работают в режиме нагрева/охлаждения, причем один цикл занимает соответственно 45 и 15 минут для излучателя и источника питания. В рамках настоящего исследования нами продемонстрировано как метод ИК термографии может быть использован для оценки тепловых режимов блоков питания бетатронов [108].

Рисунок 4.1 показывает конструкцию типичного бетатрона. Каждая установка снабжена системой воздушного охлаждения нагреваемых элементов, тем не менее, проблемой является теплоотвод от компонент, не контактирующих с охлаждающим воздухом. К таким компонентам относится магнитопровод, который состоит из центральных полюсов (2) со вставками (3), разделенными диэлектрическими прокладками. Задняя часть магнитопровода включает шесть крепящих элементов, также составляющих отсек блока питания (1). Сам магнитопровод изготовлен из пластин трансформаторной стали, соединенных эпоксидным клеем.

Большая часть используемых в бетатроне материалов являются низкотеплопроводными, поэтому теплоотвод от них путем теплопроводности невелик. Следует заметить, что до недавнего времени бетатроны проектировали с использованием стандартных расчетных схем, поэтому ощущается необходимость обеспечить низкий уровень нагрева ключевых элементов бетатронов.

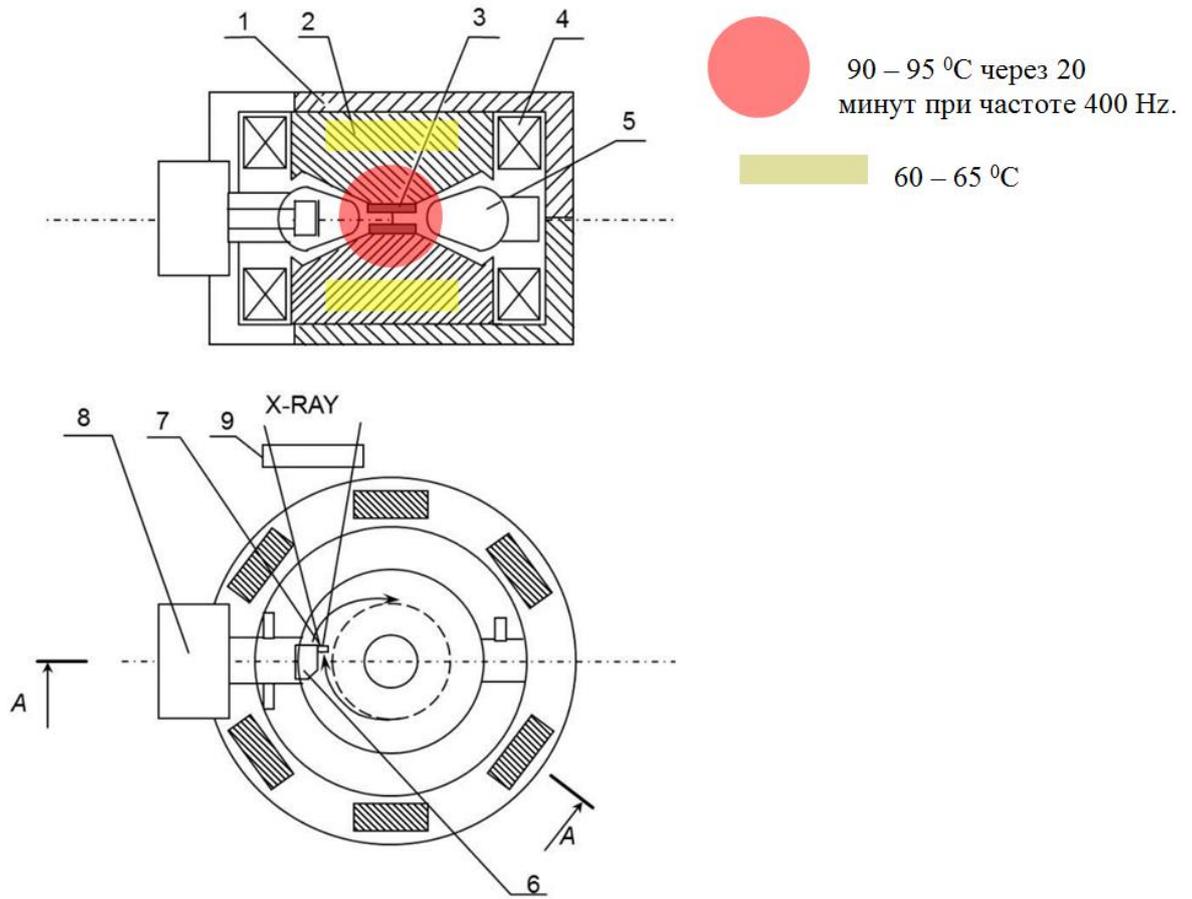


Рисунок 4.1 Схема бетатрона:

1 – магнитопровод; 2 – полюса; 3 – блок вставок; 4 – намагничивающая обмотка; 5 – камера; 6 – инжектор; 7 – мишень; 8 – трансформатор; 9 – измеритель дозы

Известно, что одной из проблем применения ИК термографии в радиоэлектронике является необходимость учитывать коэффициент излучения разнообразных компонент. Отсутствие корректировки результатов измерений по коэффициенту излучению приводит к весьма существенным ошибкам в величинах истинной температуры, что необходимо для прогнозирования рабочего ресурса компонент. Однако в настоящем исследовании акцент сделан на другой малоисследованный аспект теплового контроля в радиоэлектронике, а именно, анализ динамики температурных полей, которая проявляется при включении/выключении аппаратуры. Концепция такого подхода заимствована из активного теплового контроля конструкционных материалов, в которых скрытые

дефекты выявляют по нестационарным температурным сигналам, развивающимся на поверхности контролируемого материала. Анализ динамических температур целесообразно производить с помощью математических методов исследования нестационарных временных рядов, в частности, интегральные преобразования (Фурье и вейвлет), метод декомпозиции сингулярных значений (анализ главных компонент), нелинейный фиттинг и многие другие.

Блок питания малогабаритного портативного бетатрона на энергию 7,5 МэВ (рисунок 4.2) был проконтролирован с помощью тепловизора NEC Avio TH-9100, работающего в диапазоне длин волн 7–13 мкм и обеспечивающего 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. Частоту записи термограмм выбрали равной 0,5 Гц, что обеспечило запись 300 изображений в течение 10 минут инспекционной сессии.

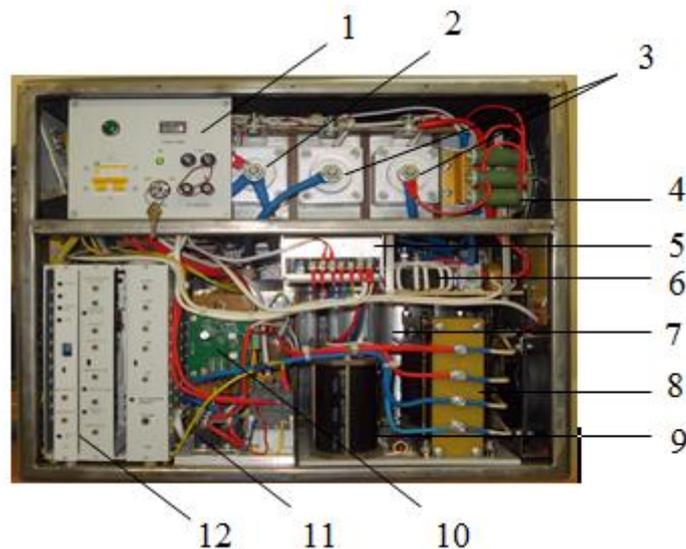


Рисунок 4.2 Блок питания бетатрона МИБ-7,5:

- 1–панель управления; 2–предварительный диодный контур; 3– тиристор контура мощности; 4–резисторы предварительного контура; 5–вспомогательный источник питания; 6–гасящий дроссель; 7–конденсаторы контура мощности; 8–дроссель схемы фильтрации; 9–конденсаторы схемы фильтрации; 10–плата задержки включения разряда; 11–диодный модуль очистки сигнала; 12–устройство управления

## 4.2. Результаты тепловизионной диагностики блока питания бетатрона

Примеры обработки записанных последовательностей ИК термограмм с помощью программы ThermoFit Pro (Томский политехнический университет) показаны на рисунке 4.3. Заметим, что исходная термограмма, полученная через 10 минут после включения бетатрона (без включения режима излучения) показывает секцию блока питания с перегретыми тиристорами.

Статистическая процедура анализа главных компонент (МАГК), примененная ко всем 300 термограммам, позволяет выделять отдельные тепловые феномены в трех первых компонентах (рисунок 4.3в-д). Первая компонента (рисунок 4.3в) напоминает исходную ИК термограмму, поскольку она показывает области с наибольшими изменениями температуры. Вторая компонента иллюстрирует менее значимые тепловые феномены, в то время как изображение третьей компоненты содержит слабые температурные сигналы.

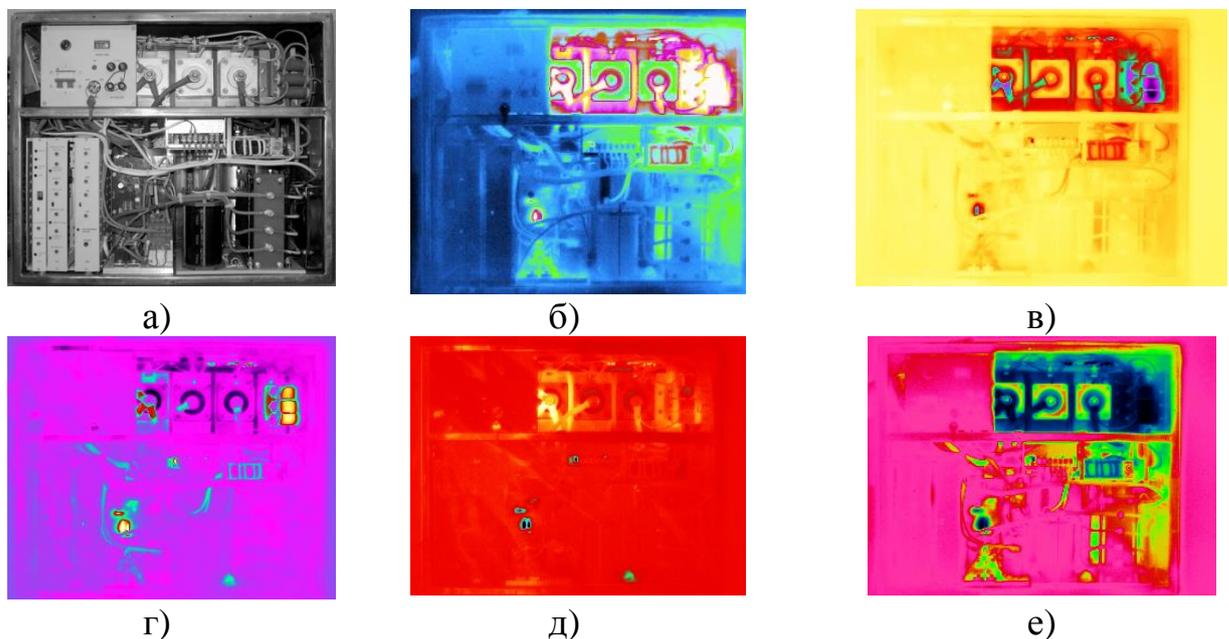


Рисунок 4.3 Результаты тепловизионной диагностики блока питания после включения бетатрона МИБ-7,5:  
 а – фотография блока питания; б – ИК термограмма через 10 минут после включения бетатрона; в – после применения метода анализа главных компонент (МАГК) – 1-я компонента; г – МАГК, 2-я компонента; д – МАГК, 3-я компонента; е – коррелограмма

Следует напомнить, что МАГК сводит последовательность из  $N$  изображений к последовательности  $N$  специфических изображений главных компонент, из которых 3–5 первых компонент являются значимыми, отражая динамику температурных зон на поверхности объекта контроля. Все другие компоненты содержат шум. Рисунок 4.3е показывает результат применения специального алгоритма, суть которого сводится к поиску коэффициента корреляции между поведением во времени в каждой точке термограммы с выбранным эталонным пикселем (алгоритм предложен в Томском политехническом университете). Результирующее изображение названо «коррелограммой» и отражает участки объекта контроля со сходным поведением точек поверхности во времени. В исследованном блоке питания особое внимание следует уделить секции с мощными тиристорами (сине-зеленая зона на рисунке 4.3е), где проектировщикам бетатронов рекомендовано усилить теплоотвод.

Следует заметить, что преимущества использования передовых алгоритмов обработки данных в активном тепловом контроле становятся визуально иллюстративными при использовании псевдоцветовых палитр, доступных в программе ThermoFit Pro.

Рисунок 4.4 показывает изменение температуры в отдельных точках блока питания (точки отмечены на термограмме слева).

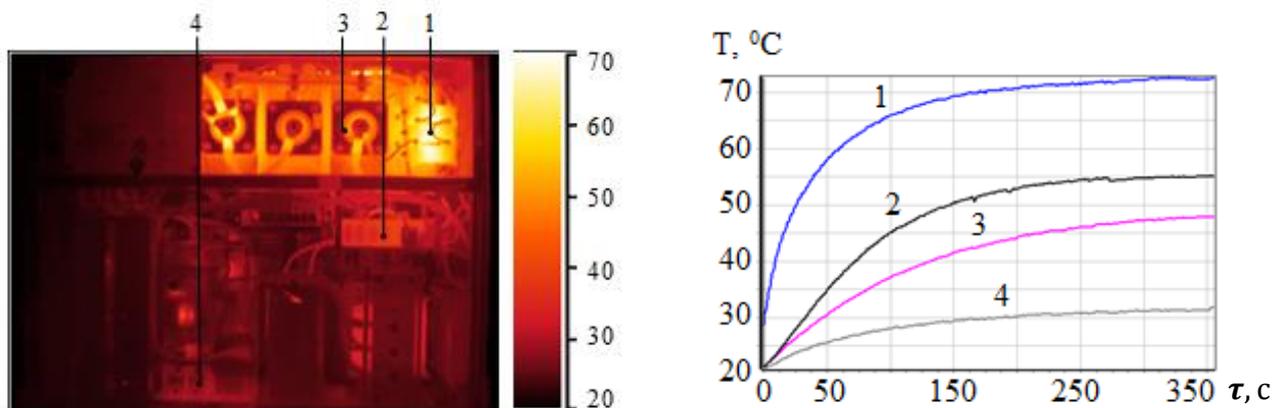


Рисунок 4.4 – Изменение температуры в отдельных точках блока питания бетатрона МИБ-7,5:

- 1–резисторы в предварительной токовой схеме; 2–гасящий дроссель;  
3–тиристоры контура мощности; 4– диодный модуль очистки сигнала.

### **4.3 Выводы к Главе 4**

- Выполнено экспериментальное тепловизионное обследование блока питания малогабаритного бетатрона МИБ-7,5, причем основное внимание уделено анализу динамики изменения температуры в отдельных точках. В частности, продемонстрирована эффективность метода анализа главных компонент, в результате чего в объекте контроля удается выделять тепловые феномены различного уровня.

- Установлен перегрев секции блока питания с мощными тиристорами, в результате чего разработчикам бетатронов рекомендовано усилить теплоотвод от данных элементов блока питания.

## **ГЛАВА 5 АКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ГИПЕРТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЕПЛООТВОДА В БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

### **5.1 Объекты контроля, аппаратура и методы исследований**

Гипертеплопроводящие панели (ГТП) являются высокотехнологичными и ответственными изделиями, обеспечивающими оптимальные температурные режимы бортовой электронной аппаратуры (ЭА), используемой в условиях открытого космоса [109, 110]. 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. Современные ГТП позволяют обеспечить передачу тепловой мощности до 50 Вт от зоны испарения (нагрева) к зоне конденсации (охлаждения) с разностью температур менее 20<sup>0</sup>С. Паспортными характеристиками ГТП являются величина передаваемого теплового потока и эффективная теплопроводность, в сотни раз превышающая теплопроводность алюминия, что обусловлено большой величиной удельной теплоты парообразования.

Работоспособность ГТП связана с обеспечением капиллярного движения теплоносителя в зону нагрева. В настоящее время анализ качества ГТП осуществляют путем математического моделирования соответствующей стационарной задачи теплопередачи [109], а также экспериментально путем оценки интегральной отводимой тепловой нагрузки.

Гипертеплопроводящие панели отводят тепло от зон с повышенной температурой, где расположены тепловыделяющие электронные блоки, используя движение теплоносителя (воды или аммиака), который проходит через многочисленные каналы и пористую структуру вследствие разницы в давлении. Энергия фазового превращения обеспечивает эффективную теплопроводность в

10100 раз выше, чем у алюминия. Фитиль ГТП содержит каналы для отвода пара (рисунок 5.1а). Массу жидкости внутри ГТП в рабочем диапазоне температур выбирают таким образом, чтобы ГТП содержала как пар, так и жидкость. При этом источники тепловыделения размещаются на поверхности ГТП произвольным образом (рисунок 5.1б).

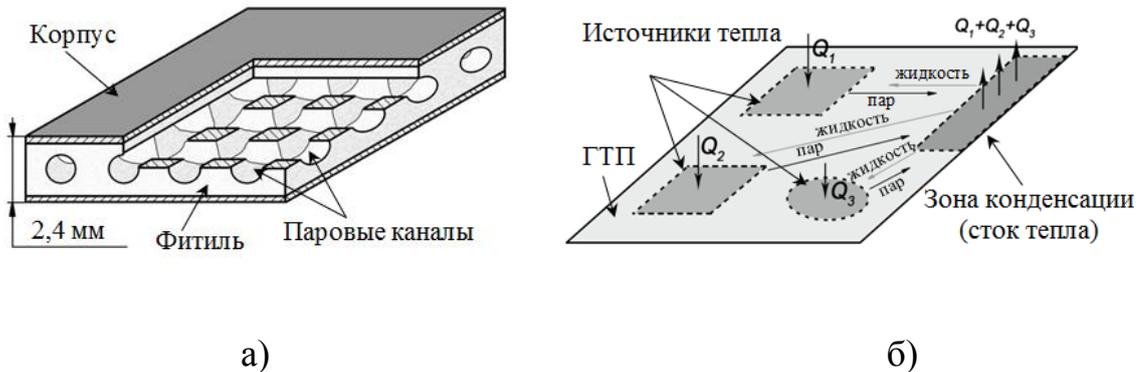


Рисунок 5.1 Схема ГТП (а) и принцип ее действия (б) (адаптировано из [111])

В новых типах космических аппаратов обычно используют Т-образные ГТП. Их устанавливают в алюминиевые рамки, а источники тепловыделения размещают непосредственно на поверхности ГТП. Нижняя часть Т-образных ГТП прижимают к охлаждаемой поверхности устройства теплового контроля аппарата.

В России ИК термографию применяли для определения температуры, но в стационарных режимах эксплуатации ГТП. Было показано, что тепловая нагрузка на уровне  $5 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$  ведет к эффективному коэффициенту теплоотдачи около  $1,7 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  [112, 113]. Этот же подход был использован при анализе источников тепловыделения, в результате чего было подтверждено, что эффективность работы ГТП слабо зависит от ее ориентации в пространстве [114–116]. Важно отметить, что многочисленные алгоритмы обработки нестационарной температуры, развитые в активном ТК (см., например, [117]), не использовались при испытаниях ГТП.

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; в ряде случаев приводит к отклонению реальных характеристик от паспортных. Методы интегральной оценки качества теплоотвода, которые предлагаются изготовителем, не удовлетворяют конечного потребителя, поскольку не удается обеспечить экспрессную отбраковку ГТП перед установкой их на спутники. Существующие методы контроля качества тепловых труб являются либо разрушающими, что в принципе неприемлемо для этих сравнительно дорогостоящих устройств, либо неразрушающими, но интегральными, то есть дающими суждение о качестве по принципу «да-нет», что делает невозможной реалистичную градацию тепловых труб по степени качества и затрудняет совершенствование технологии их изготовления.

В настоящем исследовании выполнен анализ «тонкой» структуры ГТП и получена двухмерная картина процесса теплопередачи внутри ГТП методом активной инфракрасной (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<sup>°C</sup>) при 25 °C и 25000 Вт/(м<sup>°C</sup>) при 60 °C. Внешний вид ГТП показан на рисунке 5.2а. Наличие паровых каналов отчетливо видно на негативной рентгенограмме рисунке 5.2б, полученной методом цифровой рентгенографии (более светлые зоны соответствуют бóльшему поглощению рентгеновского излучения). Использован рентгеновский аппарат РАП – 220 с фокусным пятном 2×2 мм. В качестве детектора использовали GaAs - панель (General Electric, США) с

разрешением

200 мкм. Изображение получено при энергии излучения 80 кЭв, токе трубки 3 мА и времени экспозиции 0,5 с.

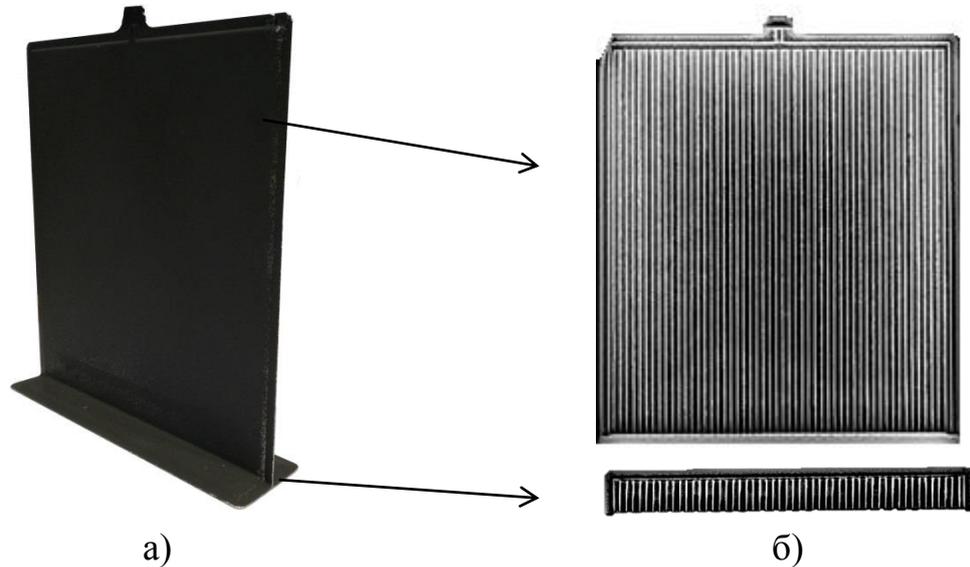


Рисунок 5.2 – Гипертеплопроводящие панели: фотография (а) и рентгеновский снимок (б)

### 5.2 «Сквозная» температуропроводность ГТП

Нами предложено рассматривать ГТП как анизотропную структуру, характеризующуюся тремя компонентами температуропроводности (см. схему на рисунке 5.3):  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ .

Для определения «сквозной» компоненты  $a_z$ , был использован известный метод «вспышки», который описан в основополагающей работе Паркера [117]. 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, который обеспечивает тепловые изображения форматом 640×512 пикселей с частотой 113 Гц, однако в наших экспериментах мы использовали режим «окна», что позволило регистрировать термограммы размером 320×256 с частотой записи 412 Гц. Такая высокая частота термографирования была необходима для того, чтобы обеспечить требуемое временное разрешение при анализе быстрых тепловых процессов, протекающих в

ГТП. Перед ГТП размещали полосовую маску из алюминия толщиной 0,5 мм, чтобы обеспечить полосовой регулярный нагрев, что необходимо для определения «поперечных» компонент температуропроводности (см. ниже). В принципе данную маску можно удалять при определении «сквозной» температуропроводности  $a_z$ , однако присутствие маски (как показано теоретически ниже) влияет только на величину поглощенной энергии и не влияет на оценку величины  $a_z$ . Обе поверхности ГТП были окрашены черной акриловой краской, что является стандартным приемом в ТК для повышения коэффициентов поглощения и излучения, хотя практическая реализация данного способа вызывает вопросы.

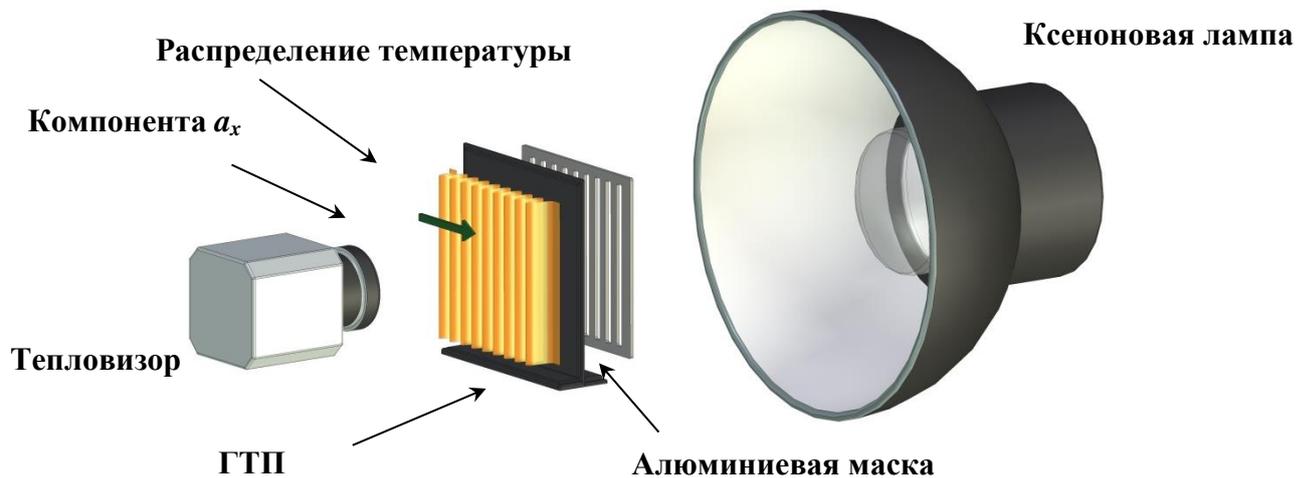


Рисунок 5.3 Определение трех компонент температуропроводности ГТП

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 известной формуле:  $a_z = 0,139L^2 / \tau_{0.5}$ , где  $L$  – толщина ГТП.

Пример кривой Паркера приведен на рисунке 5.4а. Заметим, что определение температуропроводности не требует знание истинных температур изделия, которая в нашем случае достигала 3–5°C выше начальной температуры.

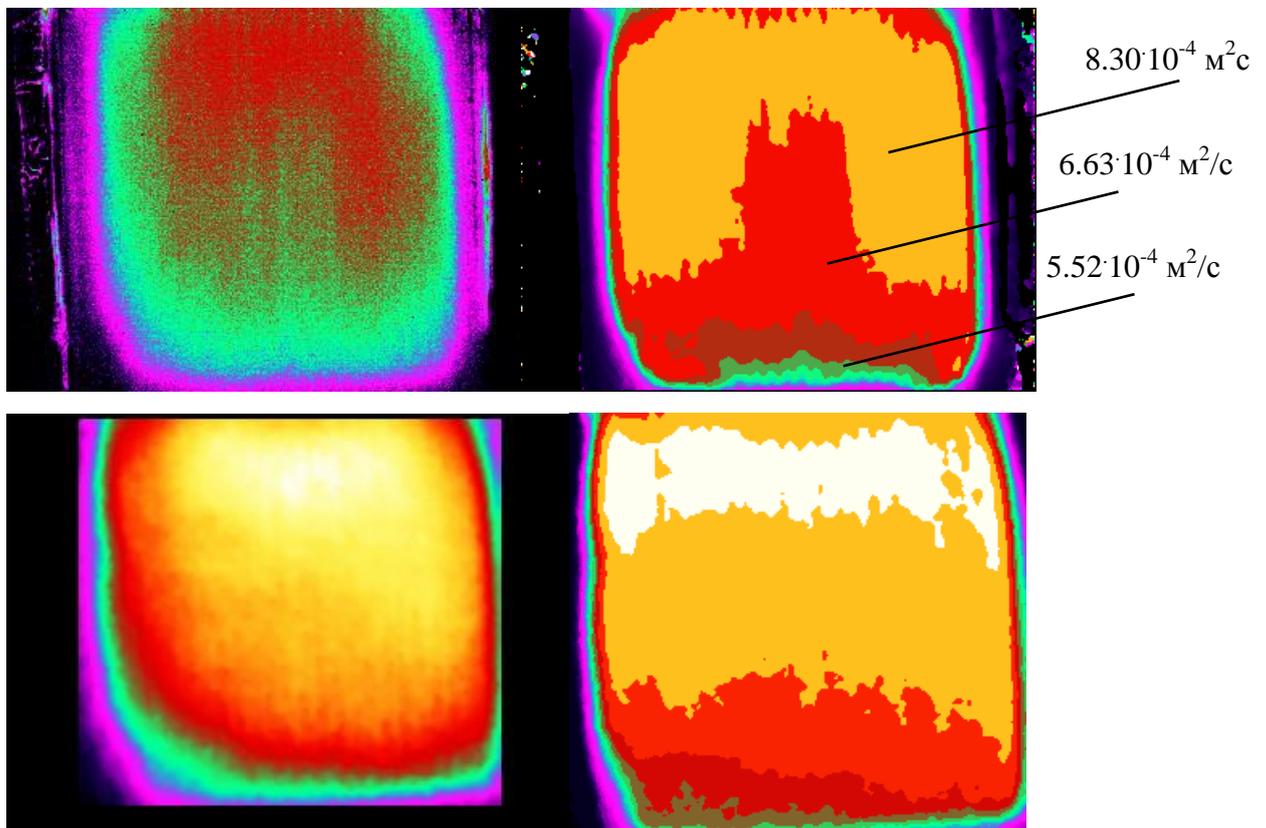
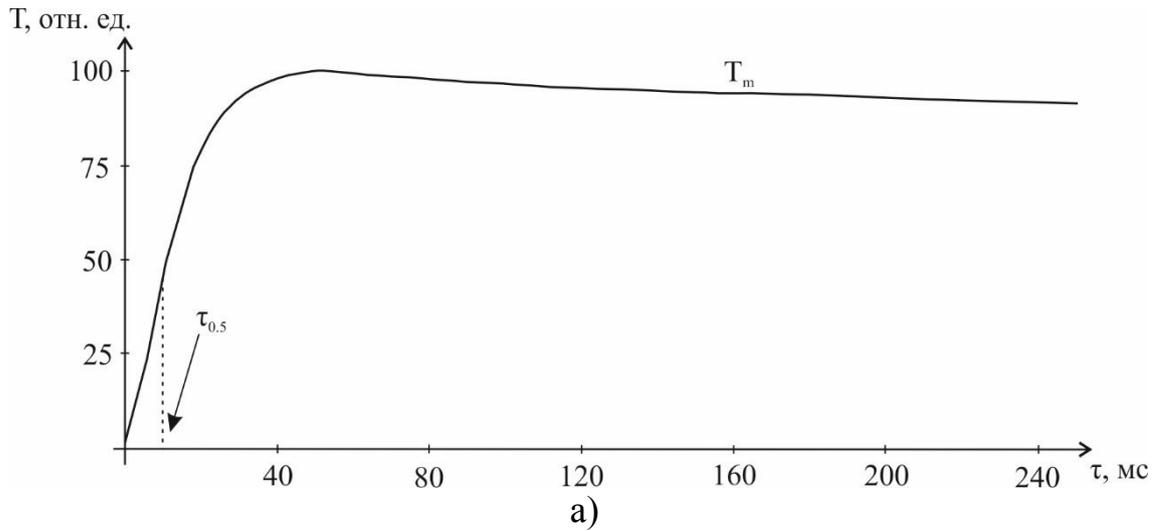
Карты температуропроводности для двух образцов ГТП показаны на рисунке 5.4б. Величины «сквозной» температуропроводности  $a_z$  распределены по ГТП неравномерно, что объясняется неравномерным распределением воды в фитиле. Разброс значений  $a_z$  составляет от  $1,4 \cdot 10^{-5}$  до  $4,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с (заметим, что температуропроводность меди равна  $10 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с). Важно также отметить, что вышеуказанная оценка получена в нерабочем режиме ГТП, характеризуя, таким образом, материалы ГТП, а не эффективную теплопроводность. Для двух исследованных экземпляров ГТП средние величины температуропроводности различались приблизительно в два раза, что, видимо, связано с различным содержанием воды в изделиях (требуемое значение составляет 5–6 г). Выполненные эксперименты позволяют сделать вывод, что определение температуры и температуропроводности позволяет получить полезную информацию о качестве ГТП.

### 5.3 «Поперечная» температуропроводность ГТП

Анализ «поперечной» температуропроводности требует инжектировать в объект исследования тепловой поток, который должен распространяться в «поперечных» направлениях, например, используя полосовой нагрев или нагрев в виде сосредоточенного (гауссовского) теплового потока. Для расшифровки температурной информации, которая содержится в зарегистрированных последовательностях ИК термограмм, обычно используют пространственное преобразование Фурье.

Формализм данного подхода был описан в ряде работ [118–121]. В наших исследованиях мы использовали методику, принятую в кандидатской диссертации А.О. Чулкова (Томский политехнический университет). В целом, алгоритм обработки данных основан на анализе «Фурье-температур» для набора пространственных частот температурного поля. Тем не менее, детальный анализ показывает, что расчетные величины температуропроводности различаются для разных частот, а оптимальную частоту заранее определить невозможно. Поэтому мы применили способ полосового нагрева, впервые предложенный в [120] и

обеспечивающий единственную несущую частоту, которая определяется числом прорезей в полосовой маске.



б)

Рисунок 5.4 Определение «сквозной» температуропроводности ГТП:  
 а – экспериментальная кривая Паркера ( $T$  как функция  $\tau$ ),  
 б – ИК термограммы двух образцов (слева) и соответствующие карты температуропроводности  $IR a_z$  (справа)

Физическая модель процесса – следующая. Ортотропная неадиабатическая бесконечная пластина нагревается тепловым потоком  $Q(x, y)Q(z)$ , который

является функцией трех декартовых  $Q(x, y)Q(z)$  координат  $x, y, z$ . Теория ниже справедлива для произвольного распределения энергии нагрева, но в нашем конкретном случае мы анализировали случай периодически-модулированного нагрева, характеризующегося периодом  $\Delta$ .

Математическая трактовка данной физической проблемы была рассмотрена ранее [118], и мы приводим ее в сокращенном виде:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_z(z) \frac{\partial T}{\partial z}]; \quad (5.1)$$

$$T(x, y, z, \tau = 0) = Q(x, y)Q_z(z) / \rho C; \quad (5.2)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=0)}{\partial z} = -h_0 T(x, y, z=0, \tau); \quad (5.3)$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T(z=L)}{\partial z} = h_L T(x, y, z=L, \tau). \quad (5.4)$$

Здесь:  $\rho, C$  – плотность и удельная теплоемкость материала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $h$  – коэффициент теплообмена со средой.

Применяя преобразование Фурье-Лапласа к уравнению (5.1) приводит к следующему выражению:

$$(\rho C p + \lambda_x \omega_x^2 + \lambda_y \omega_y^2) \bar{\bar{T}} - \bar{Q} Q_z(z) = \frac{\partial}{\partial z} [\lambda_z(z) \frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial z}], \quad (5.5)$$

где  $p$  – переменная Лапласа;  $\omega_x, \omega_y$  – пространственные частоты Фурье;  $\bar{\bar{T}}$  = температура в пространстве Фурье-Лапласа;  $\bar{Q}$  – Фурье-образ функции  $Q(x, y)$ .

Рассмотрим более простую задачу нагрева бесконечной пластины, характеризующуюся «сквозной» теплопроводностью  $\lambda_z(z)$ , однородным тепловым потоком  $Q_z(z)$ . Пусть  $T_z(z, \tau)$  – решение данной задачи.

Используя сдвиговое свойство преобразования Лапласа:

$$\bar{\bar{T}}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) = \bar{Q}(\omega_x, \omega_y) T_z(z, \tau) \exp(-a_x \omega_x^2 \tau - a_y \omega_y^2 \tau), \quad (5.6)$$

где введены «поперечные» температуропроводности  $a_x = \frac{\lambda_x}{c\rho}$  и  $a_y = \frac{\lambda_y}{c\rho}$ . Очевидно, что на нулевых пространственных частотах  $\omega_x = \omega_y = 0$ , «Фурье-температура»  $\tilde{T}$ , полученная как результат применения двойного преобразования Фурье, изменяется во времени по тому же закону, что и температура пластины при однородном нагреве потоком  $\tilde{Q}(0,0)Q_z(z)$ . Заметим, что этот вывод справедлив также и для пластины конечных размеров с теплоизолированными краями (это соответствует случаю ГТП). Принимая, что  $a_z(z)$  является величиной постоянной, а нагрев производят импульсом Дирака, «сквозная» температуропроводность может быть определена, применяя классический метод Паркера к «Фурье-температуре» при нулевых пространственных частотах  $\tilde{T}(0,0,\tau)$ .

Исключая  $T_z$  в уравнении (4.6), получаем:

$$\tilde{T}(\omega_x, \omega_y, z, \tau) / \tilde{T}(0,0, z, \tau) = \tilde{Q}(\omega_x, \omega_y) / \tilde{Q}(0,0) \exp(-a_x \omega_x^2 \tau - a_y \omega_y^2 \tau). \quad (5.7)$$

Это базовое выражение 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  $Q(x, y)Q_z(z)$ .

На практике мы использовали полосовой нагрев с периодом  $\Delta$ . Температуру следует интегрировать в интервале  $-Y$  до  $+Y$ , после чего преобразование Фурье применяют к координате  $x$ , выбирая целое число периодов (в этом случае выбирают четную функцию нагрева с максимумом при  $x = 0$ ):

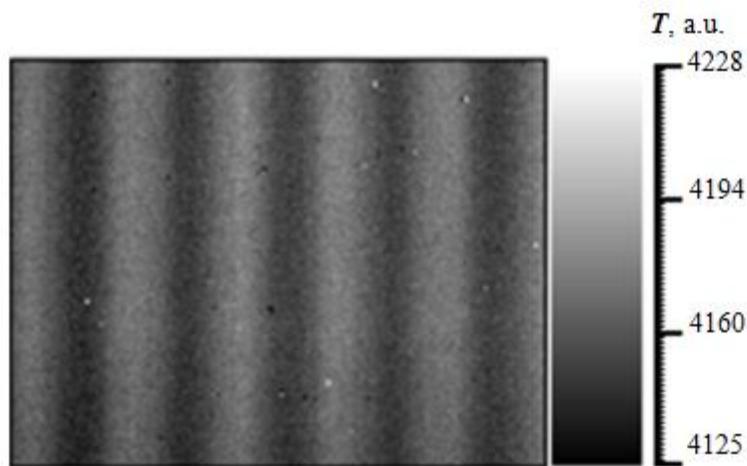
$$\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) = \frac{1}{n\Delta} \frac{1}{2Y} \int_{x'=0}^{x'=n\Delta} \int_{y'=-Y}^{y'=+Y} T(x', y', z, \tau) \cos(\omega_x x') dy' dx'. \quad (5.8)$$

Для определения  $a_x$  используют следующее линейное уравнение, следующее из формулы (4.7):

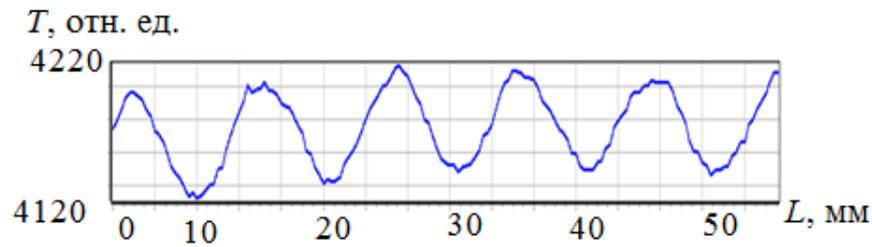
$$\text{Ln}[\tilde{T}(\omega_x, 0, z, \tau) / \tilde{T}(0, 0, z, \tau)] = \text{Ln}[\tilde{Q}(\omega_x, 0) / \tilde{Q}(0, 0)] - a_x \omega_x^2 \tau \quad (5.9)$$

Последнее уравнение, в частности, справедливо на задней поверхности пластины при  $z = 0$ . Очевидно, что «Фурье-температуру» следует анализировать на частоте  $\omega_x = 2\pi / \Delta$ , которая соответствует несущей частоте полосовой маски. Тогда температуропроводность  $a_x$  можно определить по наклону регрессионной зависимости  $\text{Ln}[\tilde{T}(\omega_x, 0, 0, \tau) / \tilde{T}(0, 0, 0, \tau)]$ . Соответственно, другую компоненту  $a_y$  следует определять, повернув маску на угол  $90^\circ$ .

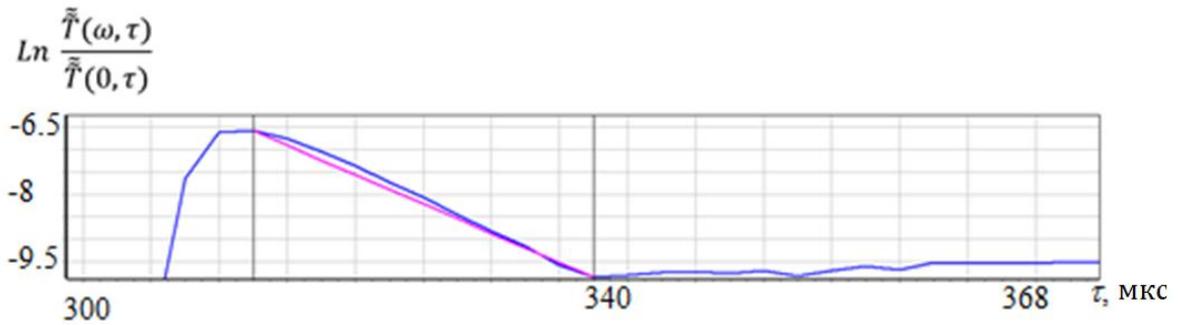
Экспериментальные результаты представлены на рисунке 5.5. Ширину прорезей в маске мы оптимизировали, достигая максимальную избыточную температуру на задней поверхности ГТП на уровне  $5^\circ\text{C}$ , что соответствовало максимальному отношению сигнал/шум. Вертикальное температурное распределение на рисунке 5.5 а и соответствующий профиль на рисунке 5.5 б был получены при вертикальном расположении как прорезей маски, так и каналов ГТП; следовательно, в этом случае определяли вертикальную, то есть перпендикулярную каналам ГТП, компоненту «поперечной» температуропроводности  $a_x$ . Следуя вышеприведенному алгоритму, величину  $a_x$  рассчитали как угол наклона профиля на рисунке 5.5 в на уровне  $10,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Соответствующая величина  $a_y$  равнялась  $14,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .



а)



б)



в)

Рисунок 5.5 Определение «поперечной» компоненты температуропроводности  $a_x$ : а – ИК термограмма (шкала в относительных единицах); б – пространственный температурный профиль; в – изменение «Фурье-температуры» во времени

#### 5.4. Анализ динамики теплоотвода в ГТП (случай одиночного теплового источника)

Другой вид тепловой стимуляции ГТП заключался в размещении локального источника тепла на поверхности ГТП. ИК термографический анализ работы ГТП в стационарном режиме был рассмотрен в работе [111]. В нашем исследовании акцент был сделан на анализ динамического температурного распределения, возникающего после того, как цилиндрический контейнер диаметром 20 мм из стали, содержащий воду температурой 85°C, был размещен на поверхность ГТП (рисунок 5.6, точка 1 на противоположной поверхности ГТП соответствует центру контейнера) [122]. Поскольку температуру ГТП записывали в течение 1 секунды с частотой 10 Гц, температура воды за это время практически не менялась. Рисунок 5.7 а показывает профили температуры в 4-х точках (точка 4 расположена на расстоянии 70 мм от точки 1).

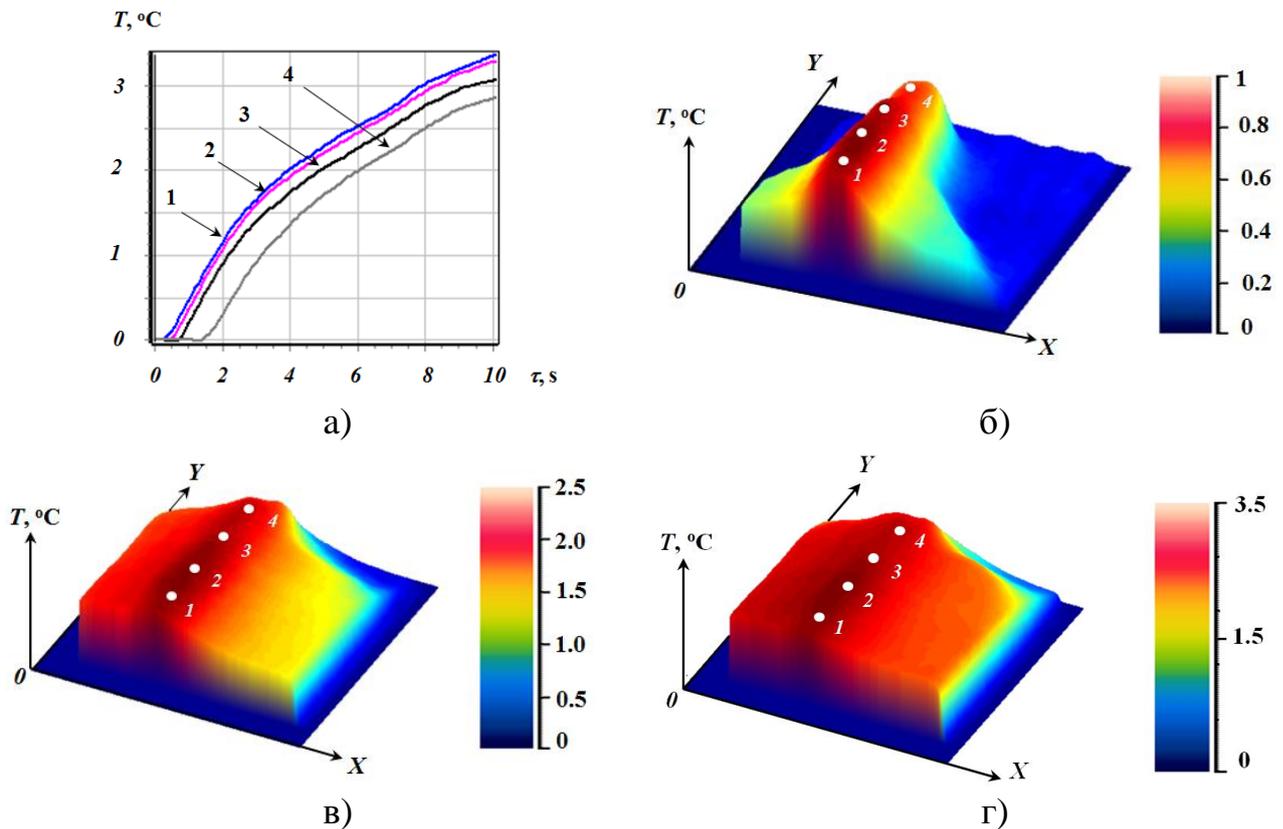


Рисунок 5.6 Нестационарное поле температуры на поверхности ГТП с локальным источником тепла (температура источника  $85^\circ\text{C}$ , диаметр источника 20 мм, точка 1 соответствует центру источника тепла):

а – эволюция температуры в 4-х точках; б – ИК термограмма через 1 с после включения источника; в – 5 с, г – 10 с.

Время задержки в нарастании температуры точке 4 составило 1,2 с после начала нагрева, и избыточная температура ГТП не превышала  $4^\circ\text{C}$  в течение всего процесса. ИК термограммы, представленные на рисунках 5.7б-г иллюстрируют определенную асимметрию температурного распределения, которая развивается в течение 10 с. Кроме того, отчетливо видны маргинальные области (вверху слева и справа), которые, как мы полагаем, связаны с недостатком воды в фитиле из-за блокировки пор. Фактически, в этих зонах не следует размещать подлежащие охлаждению электронные компоненты.

## 5.5 Выводы к Главе 5

- 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 находится в диапазоне от  $1,4 \cdot 10^{-5}$  до  $4,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/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:  $a_x = 10,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и  $a_y = 14,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/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 ГТП; 2) идентифицировать зоны неравномерного распределения воды в фитиле ГТП, включая блокировку пор и, таким образом, оптимизировать размещение электронных компонент на поверхности конкретных ГТП в рабочем режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сделать следующие 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.

- В силу указанных выше факторов, представляется целесообразным проведение исследований по активному ТК изделий радиоэлектроники, чему и посвящена настоящая диссертация.

- 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 микросхемах; в математическом плане это соответствует решению обратной задачи диагностики. Получены простые решения, 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 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  $4,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/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:  $a_x = 10,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и  $a_y = 14,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/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 ГТП; 2) идентифицировать зоны неравномерного распределения воды в фитиле ГТП, включая блокировку пор и, таким образом, оптимизировать размещение электронных компонент на поверхности конкретных ГТП 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» (Приложение А).

### Список сокращений и условных обозначений

- $T$  – температурный сигнал, °С  
 $\Delta T$  – дифференциальный температурный сигнал, °С  
 $\Delta T_m$  – максимальный дифференциальный температурный сигнал, °С  
 $\vartheta$  – избыточная температура °С  
 $a$  – температуропроводность материала, м<sup>2</sup>/с  
 $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К)  
 $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>  
 $C, c_n$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К)  
 $t$  – текущее время, с  
 $f$  – частота колебаний, Гц  
 $\omega$  – угловая (циклическая) частота колебаний, рад/с  
 $x, y, z$  – декартовы координаты, м  
 $q_j$  – одна из декартовых координат  $x, y$  или  $z$ , м  
 $i$  – количество слоев и источников тепла, т.е. дефектов  
 $T_i$  – дифференциальный температурный сигнал в  $i$ -й области, °С  
 $T_{in}$  – начальная температура изделия, °С  
 $a_i^{q_j}$  – температуропроводность в  $i$ -ой области по координате  $q_j$ , м<sup>2</sup>/с  
 $\lambda_i^{q_j}$  – теплопроводность в  $i$ -ой области по координате  $q_j$ , Вт/(м·К)  
 $w(x, y, \tau)$  – плотность мощности источников тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>  
 $Q(x, y, \tau)$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>  
 $h_F, h_R$  – коэффициенты теплообмена на передней и задней поверхностях пластины, Вт/(м<sup>2</sup>·К)  
 $T_{amb}$  – температура окружающей среды, °С  
 $L_x, L_y, L_z$  – геометрические размеры образца, м  
 $L$  – толщина изделия, м  
 $l$  – глубина залегания дефекта, м  
 $d$  – толщина дефекта, м

$V$  – объем материала, м<sup>3</sup>

$R$  – радиус, мм

$X$  – безразмерная координата

$Fo$  – число Фурье.

ИК – инфракрасный

ТК – тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

НК – неразрушающий контроль

ГТП – гипертеплопроводящие тепловые панели

ИМС – интегральная микросхема

## Словарь терминов

**инфракрасная термография:** Совокупность методов и технических средств для дистанционной регистрации и анализа характеристик тепловых (температурных) полей объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению.

**температурное поле:** Распределение температуры на участке поверхности контролируемого объекта.

**тепловой неразрушающий контроль:** Метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе изменения температурных сигналов, полученных в результате регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

**импульсный метод Паркера:** Метод определения теплофизических характеристик материала путем импульсного нагрева одной из поверхностей изделия в виде пластины и регистрации температурного отклика противоположной поверхности; теплофизические характеристики определяют, анализируя характерные точки функции изменения температуры во времени.

**бетатрон:** Циклический ускоритель электронов.

**гипертеплопроводящая плоская тепловая труба:** Плоская мини-тепловая труба, в которой отвод тепла от зоны нагрева, или зоны размещения радиоэлектронных элементов, осуществляется теплоносителем (водяным паром, аммиаком), проходящим по паровым каналам за счет перепада давления.

**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– 2018– Vol. 57(3) – Article number 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 (Шабунина) О. С.** Активный тепловой контроль гипертеплопроводящих панелей / О. С. Симонова (Шабунина), 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. Логинов В. С. Приближенная оценка теплового состояния активных элементов при малых числах Фурье ( $Fo < 0,01$ ) / В. С. Логинов, **О. С. Симонова (Шабунина)**, Д. А. Симонов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 1. – С. 112–117.
6. **Симонова (Шабунина) О. С.** Одномерная нестационарная модель тепловыделяющей системы из произвольного числа твэлов и неактивных элементов / О. С. Симонова (Шабунина), Логинов В. С. // Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 5–3. – С. 503–506.
7. Логинов В. С. Оценка нестационарного температурного режима в полой цилиндрической тепловыделяющей сборке при несимметричных условиях охлаждения / В. С. Логинов, **О. С. Симонова (Шабунина)** // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 4. – С. 107–113.
8. Касьянов С. В. Температурный режим центральных вкладышей электромагнита-бетатрона / С. В. Касьянов, **О. С. Симонова (Шабунина)** ,

- 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. Логинов В. С. Приближенное обобщенное решение теплового состояния тела при малых числах Фурье ( $FO < 0,01$ ) / В. С. Логинов, **О. С. Симонова (Шабунина)** // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №. 4. – С. 14–17.
11. Логинов В. 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.

## Список литературы

1. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / Б.Е. Бердичевского, Л.Г. Дубицкий, Г.М. Сушинцев, и др. – М.: Советское радио, 1976. – 296 с.
2. Дубицкий, Л.Г. Радиотехнические методы контроля изделий.–2-е изд., пер. и доп. / Л.Г. Дубицкий.– М.: Машгиз, 1963. – 352 с.
3. Минц Р.И., Экзоэмиссионная диагностика изделий электронной техники./ Р.И. Минц, Л.Г. Дубицкий. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1975.– 41с.
4. Вакуленко А.С. Автоматизированная диагностика неисправностей ИС с помощью тепловизора. / А.С. Вакуленко, Л.П. Дубицкий, В.Д. Кудрицкий, и др. //Электронная промышленность. – 1972. –№8.– С. 37
5. Концевой Ю.А. Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов. / Ю.А. Концевой, В.Д. Кудин – М.: Энергия, 1973.–140с.
6. Данилин Н.С. Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем. / Н.С. Данилин, О.Д. Бакланов, Ю.И. Загоровский. – М.: МО СССР, 1974. – 164с.
7. Данилин Н.С. К вопросу оперативной оценки надежности полупроводниковых устройств и схем электроники. / Н.С. Данилин, А.Е.Величко и др. // Радиоэлектроника летательных аппаратов. –1962. – №2.
8. Данилин Н.С. О термодинамической модели отказа радиоэлектронных изделий. / Н.С. Данилин, Н.В. Щербакова, В.Н. Федюнин // Радиоэлектроника летательных аппаратов. – 1972. – № 4.
9. Данилин Н.С. Определение физического процесса механизма отказов полупроводников при форсированных испытаниях температурой. / Н.С. Данилин, В.П. Улитенко и др.// Радиоэлектроника летательных аппаратов. – 1971. – № 3.

10. Данилин Н.С. К вопросу целесообразности применения неразрушающих методов контроля качества в радиоэлектронике. / Н.С. Данилин // Надежность и контроль качества. – 1974. – № 6.
11. Данилин Н.С. Методы и технические средства неразрушающего контроля и приборов автоматики, радиоэлектроники и электроники. / Н.С. Данилин. – М.: из-во «Знание», 1974. – 53 с.
12. Данилин Н.С. Некоторые вопросы оценки качества радиоэлектронной аппаратуры. / Н.С. Данилин, Э.А. Сосновский, А.Б. Малков // Радиоэлектроника летательных аппаратов. – 1973. – № 5.
13. Данилин Н.С. Некоторые вопросы оценки качества радиоэлектронной аппаратуры. / Н.С. Данилин, Э.А. Сосновский, А.Б. Малков // «Радиоэлектроника летательных аппаратов». – 1973. – № 5.
14. Будадин О.Н. Тепловой метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, изделий и конструкций: Докторская диссертация: 05.02.11 / О.Н. Будадин. – Северо-западный государственный заочный технический университет, г. Санкт-Петербург, 2001, – 361 с.
15. Будадин О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий. / О.Н. Будадин, А.И.Потапов, В.И. Колганов, и др. – М.: Наука, 2002. – 476 с.
16. Лукьянов А.В., Комплекс термодиагностики оборудования электровозов./ А.В. Лукьянов, В.Ю. Гарифулин, В.Н. Перелыгин, А.И. Романовский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – №5. – С. 179–184.
17. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review. / V.P. Vavilov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53. – No. 10. – P. 707–730.
18. Вавилов В.П. Тепловизоры и их применения. / В.П. Вавилов, А.Г. Климов – М.: Интел универсал, 2002 –88с.
19. Будадин О.Н. Обратная задача автоматизированного теплового контроля. / Д.В. Куш, Д.А. Рапопорт, О.Н. Будадин // Дефектоскопия. – 1988. – № 5. – С. 64–68.

20. Абрамова Е.В. Оптимизация диагностических систем теплового контроля. Докторская диссертация: 05.11.13 / Е.В. Абрамова. – Москва МНПО «Спектр», 2011. – С. 220.
21. Lehtiniemi R.K., Rantala Y. Infrared thermography in electronics applications. / Proc. SPIE “Thermosense-XXI”. – 1999. – Vol. 3700. – P. 235–245.
22. Lehtiniemi R.K., Fager S.M., Hynninen A.M. Applications of infrared thermography in electronics research–URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c5c5/4f046f84b4a1fb5c0a11de8adb3dda95a184.pdf> (09.04.2018)
23. Velivehi M., Perpina X., Lauro G.L. Irradiance-based emissivity correction in infrared thermography for electronic applications./ M. Velivehi, X. Perpina, G.L. Lauro // Review of Scientific Instruments. – 2011. – Vol. 82. – P. 114901.
24. Nichols J.T. Temperature measuring. / J.T. Nichols // U.S. Patent, 1935. – No. 2008793.
25. Beller W.S. Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking. / W.S. Beller // Missiles and Rockets, Jan. 4, 1965. – V. 16. – No. 22. – P. 1234–1241.
26. Green D.R. Principles and applications of emittance-independent infrared nondestructive testing. / D.R. Green // Appl. Optics, 1968. – V. 7. – No. 9. – P. 1796–1805.
27. Бекешко Н.А. Контроль качества точечных сварных соединений термографическим методом. / Н.А. Бекешко, Ю.А. Попов // Дефектоскопия. – 1971. – № 3. – С. 123–127.
28. Вавилов В.П. Теоретическое исследование одной из задач теплового контроля точечных сварных швов. / В.П. Вавилов, В.И. Горбунов, В.Б. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1973. – № 1. – С. 21–27.
29. Карпельсон А.Е. Определение оптимального режима активного теплового контроля изделий с нарушением сплошности. / А.Е. Карпельсон, Ю.А. Попов, А.Б.Упадышев // Дефектоскопия. – 1978. – № 8. – С. 86–95.

30. Вавилов В.П. Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве. / В.П.Вавилов, Х.Джин, Р.Томас и др. // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. –С. 122–130.
31. Куш Д.В. Обратная задача автоматизированного теплового контроля. / Д.В. Куш, Д.А. Рапопорт, О.Н. Будадин // Дефектоскопия. – 1988 – № 5. –С. 64–68.
32. Vavilov V. A. Review of Thermal Nondestructive Testing Methods for Aerospace Structures in the Former USSR. / V. A. Vavilov // La Recherche Aerospatiale, 1991. – No. 6. – P. 1 – 16 (in English & French).
33. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. / В.П. Вавилов — М.: Спектр, 2012.—545 с.
34. Marinetti S. Sensitivity analysis of classical heat conduction solutions applied to materials characterization. / S. Marinetti, V.Vavilov // Int. J. of Heat Transfer Engineering, Nov. 2005. – V. 26. – No. 9. – P. 50–60.
35. Maillet D. Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms. / D. Maillet, S. Andre, J.-C. Batsale // John Wiley & Sons Publ., England, 2000. –360 p.
36. Xingwang Guo. Pulsed thermographic evaluation of disbonds in the insulation of solid rocket motors made of elastomers. / Guo Xingwang, V.P. Vavilov // Polymer Testing.– 2015. – V. 45. – P. 3 – 40.
37. Mulaveesala R., Tuli S. Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection./ R. Mulaveesala, S. Tuli // Applied Physics Letters, Dec.– 2006. – V. 19. – No. 19. – P. 191913.
38. Vavilov V.P. Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends. / V.P. Vavilov // QIRT J.– 2014. – V. 11. – No. 1. – P. 66—83.
39. Vavilov V.P. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. / V.P. Vavilov, D.D. Burleigh // NDT & E International, 2015. – V. 73. – P. 28– 52.
40. Марков М.Н. Приемники инфракрасного излучения. / М.Н. Марков – М.: Наука, 1968. – 168 с.

41. Алексеенко А.Г. О возможностях и перспективах использования инфракрасных методов контроля качества и надежности микроэлектронных изделий./ А.Г. Алексеенко, Н.Н. Гаврилов // Микроэлектроника. – 1974. – Т.3. – №.5.
42. Стороженко В.А. Неразрушающий контроль качества продукции активным тепловым методом./ В.А. Стороженко, В.П. Вавилов, А.Д. Волчек; Техника. – Киев, 1988. – 128 с.
43. Жуков А.Г. Быстродействующий тепловизор. / А.Г. Жуков // Электронная промышленность. – 1972. – №4.
44. Чубаров Е.П. Выбор оптимальных параметров оптических сканирующих систем активного контроля. В.кн.:Актуальные вопросы технической кибернетики / Е.П. Чубаров, А.И. Кубышкин – М.: Наука, 1971.– 219с.
45. Вавилов В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники./ В.П. Вавилов. – М.: Радио и связь, 1984. – 162с.
46. Petrosyants K. O. Non-destructive Testing of Electronic Components Overheating Using Infrared Thermography/ К. О. Petrosyants, I. A. Kharitonov// VIIIth International Workshop NDT in Progress (NDTP2015) Oct 12-14, 2015.
47. Lehtiniemi. Applications of infrared thermography in electronics research/ Lehtiniemi; Fager; Hynninen; Aapro // Nokia Research Center — 2000.
48. Multilevel System for Thermal Design, Control and Management of Electronic Components. / Petrosyanls К. О., Kharilonov I. A., etc.// Intern. Journal of Advancements in Electronics and Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 3. – No. 2. – Pp. 22–27.
49. Thermal Modeling and Experimental Investigation of Electronic Components: Semiconductor Devices, IC Chips, PCBs and Units. / К. О. Petrosyants, I. A. Kharitonov, etc., // Proc. of the 2014 Intern. Conf. on Electrical and Electronic Engineering (EEE2014). – April 26-27, 2014. – Hong Kong. 2014.
50. Капустин А.Н. Автоматизация тепловизионного контроля и мониторинга промышленного и транспортного электрооборудования на основе обработки

- термо- и видеоизображений: Дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 / А.Н. Капустин. – Иркутск, 2005. – 229 с.
51. Перельгин В.Н. Методы и средства совместной обработки термо-оптической информации в задачах диагностики транспортных объектов. Дис. ... кан. тех.наук: 05.13.01 / В.Н. Перельгин. – Иркутск, 2011. – 221 с.
  52. Nondestructive Testing Handbook, A.S.N.T., U.S.A., 2001. V.3 “Infrared and Thermal Testing”. – 714 p.
  53. Use of infrared thermography in electronics [electronic resource]: ES&T. – URL: [www.ept.ca/features/use-infrared-thermography-electronics/](http://www.ept.ca/features/use-infrared-thermography-electronics/) (09.04.2018)
  54. Thermography in Electronics and Eletrical Indusry.-InfraTec [electronic resource]: InfraTec. URL: [www.infratec.co.uk/thermography/industries-applications/electronics-electrical/](http://www.infratec.co.uk/thermography/industries-applications/electronics-electrical/) (28.03.2018)
  55. Breitenstein O. Lock-in IR Thermography for Functional Testing of Electronic Devices. / O. Breitenstein // Proceedings 7th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT 2004), Rhode-St.-Genese, Belgium, 6.7.2004, Proceedings. –pp. B.3.1-6
  56. Carslow H.S. Conduction of heat in solids. / H.S. Carslow, T.S. Jaeger. – U.K.: Oxford Univ. Press, 1959.—580 p.
  57. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков — М.: Высшая школа, 1967.—604 с.
  58. Логинов В. С. Приближенная оценка теплового состояния активных элементов при малых числах Фурье ( $Fo < 0,01$ ) / В. С. Логинов , О. С. Симонова (Шабунина) , Д. А. Симонов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 1. – С. 112–117.
  59. Логинов В. С. Оценка нестационарного температурного режима в полой цилиндрической тепловыделяющей сборке при несимметричных условиях охлаждения / В. С. Логинов, О. С. Симонова (Шабунина) // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – №. 4. – С. 107–113.

60. Касьянов С. В. Температурный режим центральных вкладышей электромагнита-бетатрона / С. В. Касьянов, О. С. Симонова (Шабунина), Д. А. Симонов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №. 1/2. – С. 94–97.
61. Логинов В. С. Приближенное обобщенное решение теплового состояния тела при малых числах Фурье ( $Fo < 0,01$ ) / В. С. Логинов, О. С. Симонова (Шабунина) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – №. 4. – С. 14–17.
62. Логинов В. 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.
63. Симонова (Шабунина) О. С. Одномерная нестационарная модель тепловыделяющей системы из произвольного числа твэлов и неактивных. / О. С. Симонова (Шабунина), В.С. Логинов // Фундаментальные исследования – 2014. – № 5–3.
64. Логинов В.С. Приближенный метод расчета температурных режимов магнитопроводов трансформаторов и бетатронов / В.С. Логинов // Электричество. – 1986. – №10. – С. 21–25.
65. Логинов В.С. Условия выполнения связи нестационарных избыточных температур активного элемента / В.С. Логинов // Известия РАН. Энергетика. – 2002. – №1. – С. 43–52.
66. Логинов В.С. Выбор параметров импульсов тока, возбуждающих электромагниты малогабаритных батетронов. / В.С. Логинов, Г.Л. Чахлов, В.Л. Чахлов // Изв. вузов Физика. – 1976. – №8. – С.76.
67. Программа расчета нестационарного температурного поля в полом цилиндрическом активном элементе с произвольным числом слоев тепловой изоляции: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012612616 / Дорохов А.Р., Симонова О.С., Сунгатулина В.И. – заявл. 13.03.2012г.

68. Логинов В.С. Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. / В.С. Логинов – М.: Физматлит, 2009. – 267 с.
69. Воробьев А.А. Ускорители электронов Под ред. А.А. Воробьева и Б.А. Кононова. Учеб. Пособие / А.А. Воробьев, А.Н. Диденко, Б.А. Кононов и др.– Томск: ТПИ, 1964. – 414 с.
70. Комар Е.Г. Основы ускорительной техники./ Е.Г. Комар – М.: Атомиздат, 1975. – 368 с.
71. Ананьев Л.М. Разработка малогабаритного индукционного ускорителя для исследования буровых скважин. / Л.М. Ананьев, В.В. Сулин, В.Л. Чахлов; В кн.: Электронные ускорители. – Томск: изд-во ТГУ, 1961. – С 328–334.
72. Коломенский А.А. Теория циклических ускорителей. / А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев – М.: Физматгиз, 1962. – 214 с.
73. Kollath R. Untersuchungen an einem 15 MV-Betatron / Kollath R., Schumann G.// Z. Naturforsch. – 1947. – 2a. – 11/12. – S. 634-642.
74. Wideröe R. Elektrotechnische Probleme des Betatrons / R.Wideröe // VDE-Fachber. 1953. – P 17.
75. Гурченко А.А. Система охлаждения электромагнита двухлучевого бетатрона на 25 МэВ / А.А. Гурченко, И.В. Шипунов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1959. – №1. – С. 132–135.
76. Гельперин Б.Б. Принципы проектирования и основные данные бетатронных установок Московского трансформаторного завода / Б.Б. Гельперин // АЭ.1959. – Т. 7. – №6. – С. 509–518.
77. Логинов В.С. О законе связи между избыточными температурами в полом цилиндрическом активном элементе / В.С. Логинов // Известия РАН. Энергетика. – 1995. – №3. –С. 200–204.
78. Казанский Л.Н. Электронный кольцевой фазотрон ФИАН. V. Бетатронные сердечники / Л.Н. Казанский, В.Н. Канунников, Б.Н Яблоков.// ПТЭ. –1967. – №5. – С. 90–92.

79. Жуйков В.В. Метод расчета на ЭЦВМ нестационарных температурных полей в дисках турбомашин / В.В. Жуйков, В.И. Локай // Изв. вузов. Авиационная техника.–1978. – №1. – С. 114–116.
80. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических машин. / А.М.Залесский, Г.А. Кукеков – Л.: Энергия, ЛО, 1967. – 369 с.
81. Тепловые трубы в электрических машинах / В.М. Петров, А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев и др.; Под ред. В.М. Петрова. – М. Энергоатомиздат, 1987. – 152 с.
82. Иванов В.В. Температурный режим магнитопроводов бетатронов / В.В. Иванов, А.В. Фурман // Изв. вузов. Электромеханика, 1966. – №8. – С. 856–861.
83. Шилин Г.Ф. Тепловой расчет намагничивающей обмотки бетатрона с воздушным охлаждением при изменяющемся тепловыделении по высоте обмотки / Г.Ф. Шилин // Изв. вузов. Электромеханика, 1966. – №8. – С. 862–867.
84. Логинов В.С. К расчету температурного поля в активном элементе прямоугольного сечения электрического аппарата / В.С. Логинов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – №4. – С. 72–76.
85. Логинов В.С. Исследование температурных режимов бетатронов: Дис. ...канд. техн. наук/ В.С. Логинов. – Томск, 1973. – 251 с.
86. Гурченко А.А. Исследование процесса охлаждения в магнитопроводах на электрических моделях / А.А. Гурченко // Изв. вузов. Энергетика, 1960. – №3. – С. 20–25.
87. Wenger S. Zustandsüberwachung von Maschinen – standerblechpaketen durch elektrische Messungen / S.Wenger // ELIN – Yeitschrift. 1984. – 36. – 3/4 . –S. 111–117.
88. Nelson D.A. Electric Field Effects on Natural Convection in Enclosures / D.A. Nelson, E.J. Shaughnessy // Journal of Heat Transfer, 1986. – №4. – P. 749.
89. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. / В.С. Зарубин – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.

90. Фукс Г.И. К расчету температурных режимов трансформаторов и бетатронов / Г.И. Фукс, В.С. Логинов // Электротехника. – 1971. – №12. – С. 10–11.
91. Логинов В.С. Оценка электрических потерь в электромагните бетатрона типа ПМБ-6 с импульсным питанием током повышенной частоты / В.С. Логинов, А.А. Гейзер, В.Л. Чахлов // Изв. Томского политех. ин-та. – 1974. – Т. 279. – С. 3-9
92. Логинов В.С. Температурное поле активного элемента прямоугольного сечения электрического аппарата / В.С. Логинов // Электричество, 1989. – №4. – С. 79-82.
93. Дорохов А.Р. Теплообмен при нестационарной пленочной конденсации пара / А.Р. Дорохов, П.Т. Петрик, В.С. Логинов // Письма в ЖТФ. – Т. 21 – вып. 20. – 26 октября 1995. – С. 68–71.
94. Филиппов М.Ф. Бетатрон с симметричным магнитным полем / М.Ф. Филиппов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1959. – №2. – С. 131–134.
95. Павловский А.И. К вопросу зависимости интенсивности бетатрона от энергии инжекции / А.И. Павловский, Г.В. Склизков, Г.Д. Кулешов и др. // ЖТФ. – 1963. – Т. 33. – №3. – С. 374–376.
96. Дорохов А.Р. Моделирование тепловыделяющих систем: Учебное пособие./ А.Р.Дорохов, А.С. Заворин, А.М. Казанов и др. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 234 с.
97. Шипунов И.В. Вопросы охлаждения электромагнита бетатрона./ И.В. Шипунов, Б.М. Яковлев. // Изв. вузов. Электромеханика, 1959. – №2. – С. 121–123.
98. Шилин Г.Ф. Вопросы нагрева и охлаждения обмоток бетатронов: Дис. ... канд. техн. наук. / Г.Ф. Шилин – Томск, 1967. – 177 с.
99. Об одном методе определения собственных чисел в нестационарных задачах теплопроводности / В.А. Кудинов, В.В. Дикоп, Р.Ж. Габдушев и др. // Изв. РАН. Энергетика. 2002. – № 4. – С. 112–117.
100. Кудинов В.А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: Учеб. пособие для вузов. /

- В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников. – М.: Высш. школа, 2005. – 430 с.
101. Полежаев Ю.В. Тепловая защита. / Ю.В. Полежаев, Б.Ф. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.
102. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. / Г.А. Гринберг. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – 729 с.
103. Иорданишвили Е.К. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. / Е.К. Иорданишвили, В.П. Бабин. – М.: Наука, 1983. – 219 с.
104. Акаев А.А. Новый приближенный аналитический метод для решения краевых задач теплопроводности / Акаев А.А., Дульнев Г.Н.// Сб. тр. ЛИТМО. – 1972. – Вып. 70. – С. 3–48.
105. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. / Цой П.В. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 423 с.
106. Ананьев Л.М. Малогабаритные бетатроны и их применение в дефектоскопии./ Л.М. Ананьев, В.Л. Чахлов, М.М. Штейн и др.// Дефектоскопия. – 1968. – №6. –С.60–64.
107. Вайнберг Э.И. Опыт применения бетатронов НИИ интроскопии при ТПУ в составе компьютерных томографов «проминтро». / Э.И. Вайнберг, И.А. Вайнберг, В.А. Касьянов и др.// Известия Томского политехнического университета.– 2008 – Том 312. – №2. – С.32–35.
108. 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.
109. Shukla K.N. Heat Pipe for Aerospace Applications –An Overview. / K.N. Shukla//Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, – 2015. – No. 5. – P. 1-14.
110. Eastman G.Y. The heat pipe. / G.Y. Eastman. // Scientific American. – 1968 – Vol. 218. – No. 5. – Pp. 38–46.

111. Деревянко В. А. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах. / В. А. Деревянко, Д.А. Нестеров, В.Е. Косенко и др. //Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – № 6 (52). – С. 111–116.
112. Кулагин В.А. Численное исследование характеристик тепловых труб в составе радиоэлектронного оборудования космических аппаратов. / В.А. Кулагин, Н.Ю. Соколов // Техника и технологии.– 2015. – №8 (6). – С. 769–773.
113. Гадельшин М.Ш., Кибардин А.В., Выгузова К.В. Применение программного продукта ThermaSAM Researcher в исследовании теплопередающих устройств. / М.Ш. Гадельшин, А.В. Кибардин, К.В. Выгузова // Проблемы современной науки и образования.– 2016. – № 30(72). – С. 30–32.
114. Модуль радиоэлектронной аппаратуры с гипертеплопроводящим основанием: Патент №2403692 Рос. Федерация: H05K 1/00 (2006.01)H05K 7/20 (2006.01) / С.Б. Сунцов, В.Е. Косенко; Опубл. 10.11.2010, бюлл. №31.
115. Simonova O.S. Active thermal testing of hyper-thermoconductive panels / O.S. Simonova, A.O. Chulkov, V.P. Vavilov and other // Russian Journal of Nondestructive Testing.– 2017. – Vol. 53. – No. 6. – P. 453–456.
116. Симонова (Шабунина) О.С. Активный тепловой контроль гипертеплопроводящих панелей / О.С. Симонова (Шабунина), А.О. Чулков, В.П. Вавилов и др. //Дефектоскопия. – 2017. – №6. – С.58 – 62
117. Shepard S.M. Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance./ S.M. Shepard, J. Hou, J.R. Lhota. // Opt. Eng. –2007. – Vol. 46. – No. 5. – P. 051008.
118. Parker W.J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity./ W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler and other // J. Appl. Physics, Sept. 1961. – Vol. 32. – P. 1679–1684.

119. . Measurements of thermal diffusivities through processing of infrared images. / I. Philippi, J.-C. Batsale, D. Maillet and other // Rev. Sci. Instrum. – Jan. 1995. – Vol. 66(1).
120. Bison P.G. Local thermal diffusivity measurement. / P.G. Bison, E. Grinzato // J. Quant. Infr. Thermogr. – 2004. – Vol. 1. – No. 2. – P. 241–250.
121. Krapez J.-C. Measurement of in-plane diffusivity in non-homogeneous slabs by applying flash thermography. / J.-C. Krapez, L. Spagnolo, M. Frieb // Intern. J. of Thermal Sciences. – 2004. – Vol. 43. – P. 967–977.
122. Simonova O.S. Infrared thermographic testing of hyperconductive flat heat pipes / O.S. Simonova, A. O. Chulkov, V. P. Vavilov and other // Optical Engineering– 2018– Vol. 57(3) – Article number 035105 (March 2018).

## Акт использования результатов диссертационной работы



Акционерное общество  
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972  
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru  
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора  
по электрическому проектированию и  
системам управления КА акционерного  
общества «Информационные  
спутниковые системы» имени академика  
М.Ф. Решетнёва» (АО «ИСС»),  
председатель секции №2 НТС, к.т.н.,



С.Г. Кочура

«03» 05 2018

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы  
Симоновой Ольги Сергеевны  
«Теплофизические аспекты пассивного и активного теплового контроля  
электронных устройств»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС»  
В.Н. Школьного,

начальника отдела конструирования бортовой РЭА АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова,  
начальника сектора АО «ИСС» О.А. Климкина

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС»  
следующих результатов диссертационной работы Симоновой О.С.:

1. Разработка методики неразрушающих испытаний гипертеплопроводных мини-тепловых труб отечественного производства.
2. Технология определения эффективной температуропроводности тонких многослойных структур (мини-тепловых труб) методом Паркера.
3. Методика моделирования локальных источников тепла в изделиях микроэлектроники с помощью компьютерной программы ThermoSource.

В АО «ИСС» использованы результаты разработки методики неразрушающих испытаний тепловых труб отечественного производства, использующей новый подход к анализу внутренней структуры тепловых труб, позволяющий оценивать теплофизические свойства объектов по их температурному отклику на импульсное тепловое воздействие. Результаты испытаний ряда образцов тепловых труб используются для улучшения технологии их изготовления.

Начальник отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС»



В.Н. Школьный

Начальник отдела конструирования бортовой РЭА АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник сектора АО «ИСС»



О.А. Клишкин