

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.7.013:621.396.6

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).750-761

ГРНТИ 59.41+47.49

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ЛАТЕНТНЫХ ДЕФЕКТОВ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Карачинов В. А.¹, Петров Д. А.^{1,2}, Шергин С. С.^{1,3}, Гаврушко В. В.¹,
Быстров Н. Е.¹, Петров В. М.¹

¹Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)

²ОАО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Россия)

³АО «Аскольд» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Современные тепловые трубы (ТТ), являясь специальными устройствами охлаждения, эффективно обеспечивают непрерывный отвод тепловой энергии. В настоящее время в РЭС широкое применение получил класс ТТ, корпуса которых изготовлены в виде профилей специальной конструкции из алюминиевых сплавов. Для получения компьютерной модели были разработаны геометрическая, тепловая и математическая модели ТТ. Так же выполнена серия расчетов, которые позволили визуализировать морфологию теплового поля ТТ и выявить влияние дефектов разных типов. В рамках бесконтактной технологии диагностики качества ТТ разработана новая компьютерная модель теплового поля, обеспечивающая объективность трактовки сигнала при тепловизионной диагностике качества.

Ключевые слова: тепловая труба, компьютерная модель, тепловое поле, дефект, диагностика качества

Для цитирования: Карачинов В. А., Петров Д. А., Шергин С. С., Гаврушко В. В., Быстров Н. Е., Петров В. М. Моделирование теплового поля в условиях оптической локализации латентных дефектов тепловых труб // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 750-761. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).750-761

Research Article

MODELING OF THE THERMAL FIELD IN CONDITIONS OF OPTICAL LOCATION OF LATENT DEFECTS IN HEAT PIPES

Karachinov V. A.¹, Petrov D. A.^{1,2}, Shergin S. S.^{1,3}, Gavrushko V. V.¹,
Bystrov N. E.¹, Petrov V. M.¹

¹Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

²JSC OKB Planeta (Veliky Novgorod, Russia)

³Askold JSC (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract Modern heat pipes (HP), being special cooling devices, effectively provide continuous removal of thermal energy. Currently, the HP class the bodies of which have a specially designed shape and are made of aluminum alloys, is widely used in radio-electronic equipment engineering. The geometric, thermal, and mathematical models of HP were developed for computer simulation. A series of calculations were also performed, which made it possible to visualize the morphology of the thermal field of HP and identify the influence of defects of different types. As part of the contactless HP quality diagnostics technology, a new computer model of the thermal field has been developed to ensure the integrity of the signal interpretation during the thermal imaging quality diagnostics.

Keywords: heat pipe, computer model, thermal field, defect, quality diagnostics

For citation: Karachinov V. A., Petrov D. A., Shergin S. S., Gavrushko V. V., Bystrov N. E., Petrov V. M. Modeling of the thermal field in conditions of optical location of latent defects in heat pipes // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 750-761. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).750-761

Введение

Совершенствование таких технических характеристик современных радиолокационных систем большой мощности, как, разрешающая способность, точность, помехозащищенность, устойчивость к ионизации атмосферы обусловлено функционированием их в высокочастотных диапазонах [1-4]. В то же время повышение рабочей частоты неизбежно ведет к увеличению плотности тепловых потоков, реализующихся в процессе работы приемо-передающих модулей, росту температуры эксплуатации наиболее критичных ЭРЭ и снижению надежности [5-6]. Решение отмеченной проблемы с учетом особенностей конструкций РЛС известно, и оно напрямую связано с возможностью применения специальных систем охлаждения на основе тепловых труб (ТТ). Современные ТТ плоские и профильные, являясь специальными устройствами охлаждения, эффективно обеспечивают непрерывный отвод тепловой энергии от АФАР РЛС как в бортовом, так и наземном исполнении [1, 6-8]. При серийном изготовлении ТТ, адаптированных к конструкции изделия, также важной проблемой становится выявление технологических дефектов еще на стадии производства, их анализ и устранение факторов, вызвавших дефект. Традиционно в решении этих задач значительная роль принадлежит методам визуализации на основе экспериментально регистрируемых рентгеновского и теплового контрастов с последующей цифровой обработкой изображений [9, 10]. Научный и практический интерес представляют также компьютерные методы визуализации морфологии теплового поля ТТ не требующие проведения натурных экспериментов [11]. Для того чтобы оценить степень влияния латентных дефектов пассивного и активного типов на диагностируемые характеристики теплового поля ТТ, требуется разработать новую компьютерную модель (КМ). Вопросам решения поставленной задачи и посвящена данная работа.

Методика исследований

Описание конструкции профильных ТТ

В настоящее время в РЭС широкое применение получил класс ТТ, корпуса которых изготовлены в виде профилей специальной конструкции из алюминиевых сплавов (АД-31 по российскому стандарту ГОСТ 4784-74 или сплавов 6060, 6061, 6063 по американскому стандарту AMS 4116) методом экструзии, одноканальные или двухканальные, а в качестве капиллярно-пористой структуры используются продольные канавки, сформированные в едином технологическом цикле (рисунок 1).

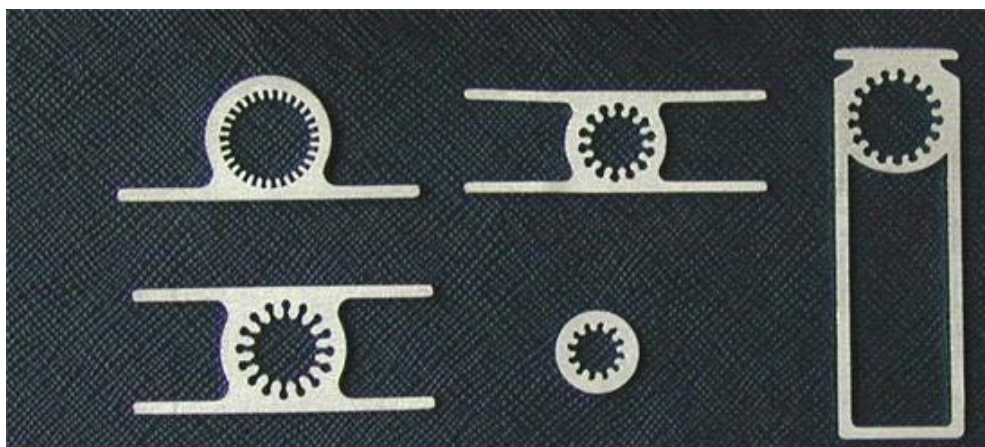


Рисунок 1. Виды профилей алюминиевых ТТ

В качестве теплоносителя (рабочего тела) в таких низкотемпературных ТТ наиболее часто применяют ацетон и аммиак высокой чистоты [9]. В целом номенклатура выпускаемых отечественной промышленностью ТТ с аксиальными канавками достаточно широка и разнообразна. Так, по температурному диапазону она простирается от криогенных до высокотемпературных. Типичные значения их термического сопротивления составляют от 0,01 до 0,12 К/Вт, а плотность подводимого теплового потока от 0,01 до 20 Вт/см². Оребренные профильные ТТ, являясь достаточно изученными объектами, обладают симметричной структурой и поэтому в данной работе рассматривались как модельные при решении сформулированных задач. Кроме того, принцип оребрения ТТ был реализован нами для разработки нового запатентованного метода диагностики качества таких труб, изготовленных из алюминиевого сплава [10]. В этом методе в качестве объекта измерений используется пространство между ребрами ТТ, которое представляет собой полость в виде модели абсолютно черного тела. Поэтому контролируемая поверхность тепловой трубы между ребрами обладает большим значением коэффициента излучения, нежели на плоском участке трубы, что способствует улучшению качества, регистрируемого ИК – яркостного контраста теплового поля (повышается информативность и достоверность) и увеличению коэффициента поглощения поверхности, что имеет важное значение и при фотонном методе нагрева алюминиевого сплава. Исходя из отмеченного, методика компьютерного моделирования тепловых полей, представленная в данном разделе была адаптирована к новому методу диагностики качества ТТ.

Известно, что любая конструкция ТТ может содержать различного рода дефекты, которые в значительной степени определяют не только ее прочностные характеристики, но и оказывают влияние на тепловой режим [9]. Природа дефектов разнообразна и их появление в основном обусловлено как несовершенством технологии изготовления (включения второй фазы, зерна, локализованные в корпусе), так и условиями эксплуатации ТТ. Например, различного рода поры,

трещины могут образовываться за счет усталостных процессов при длительной эксплуатации ТТ в условиях изменяющегося давления (температуры) теплоносителя или вибрационных воздействий. Окисные островки на поверхности корпуса изменяют численные значения коэффициентов отражения (излучения) материала. Газовые полости внутри парового канала, чаще всего, возникают при протекании химических реакций с участием теплоносителя и материала капиллярно-пористой структуры. В рамках компьютерного эксперимента несомненный интерес представляют исследования, показывающие влияние дефектов на динамику морфологии температурного поля корпуса ТТ. В таблице 1 приведены только основные сведения по использованным в расчетах моделям дефектов.

Таблица 1. Виды дефектов конструкции ТТ. Модельное представление

Вид дефекта		Геометрическая форма дефекта				
Пассивный ($q = 0$ Вт/м ²)		Точка	Нить	Круг	Квадрат	Сегмент
Активный	Источник (ИТП) ($q = q_i$, Вт/м ²)	Точка	Нить	Круг	Квадрат	Сегмент
	Сток (СТП) ($q = -q_i$, Вт/м ²)	Точка	Нить	Круг	Квадрат	Сегмент

Геометрическая модель ТТ

В качестве исходного варианта была выбрана геометрическая модель оребренной профильной ТТ с симметричной структурой, изображенной на рисунке 2 а.

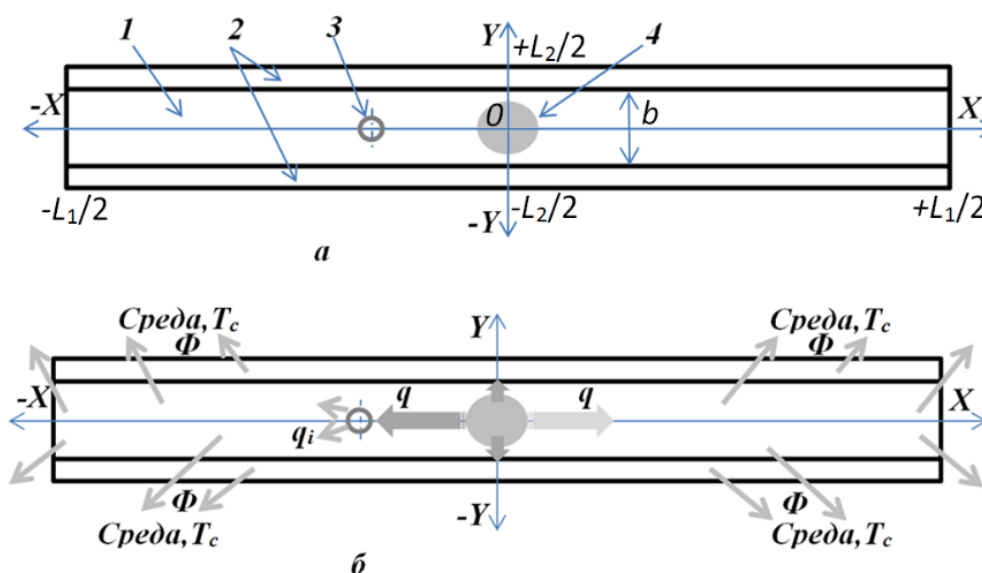


Рисунок 2. Геометрическая (а) и тепловая (б) модели профильной ТТ с дефектом круглой формы. Пример: активный дефект (источник теплового потока, теплопроизводительность, “+” q_i , Вт/м²). 1 – Корпус; 2 – Ребра; 3 – Дефект; 4 – ИТП

Геометрические параметры ТТ в моделях в среднем соответствовали промышленно выпускаемым ТТ из алюминиевых сплавов и составляли: длина $L_1 \approx 150 \div 400$ мм; ширина $L_2 \approx 30$ мм; расстояние между ребрами $b \approx 5 \div 10$ мм; средняя глубина полости между ребрами $h \approx 9$ мм. В центре корпуса ТТ между ребрами располагался индуцированный светом источник теплового потока (ИТП). При проведении расчетов использовались модели ИТП круглой формы, а также точечный.

Кроме ИТП корпус также содержал элемент – «дефект» (3) (рисунок 2 а). Его форму и размер можно было изменять в ходе компьютерного эксперимента, а для наглядности и удобства в методическом плане дефект располагался на оси ТТ. Пространственной ориентацией геометрической модели ТТ была горизонтальная.

Тепловая модель ТТ

В качестве базового варианта была разработана нестационарная тепловая модель ТТ, состоящая из четырех тел: корпус ТТ (ограниченный горизонтальный стержень); импульсный источник теплового потока (ИИТП); дефект; окружающая среда. В качестве модели пускового режима ТТ рассматривался равномерный пуск ($\tau = 0 \div 360$ с). Для данной тепловой модели были сформулированы следующие упрощения: 1) идеальный тепловой контакт ИИТП с поверхностью ТТ; 2) не учитывалась аккумуляция тепловой энергии в ИИТП; 3) не учитывалось контактное тепловое сопротивление между дефектом и корпусом ТТ (идеальный тепловой контакт), а тело дефекта рассматривалось как изотропная среда; 4) активные дефекты в тепловой модели были представлены как независимые ИТП с изотермическими поверхностями, при этом не учитывался отвод тепла с поверхности дефекта в окружающую среду. Таким образом, ИИТП формирует по выделенным направлениям стержня тепловой поток с одинаковой плотностью $q_j, \text{Вт/м}^2$. В рамках модели был предусмотрен переход от изотропного стержня к анизотропному, путем задания соответствующих коэффициентов теплопроводности λ_x и λ_y . Следует отметить, что основными механизмами рассеяния теплового потока ($\Phi, \text{Вт}$) с поверхности стержня в воздушную (газовую) среду с температурой T_c являлись свободная (естественная) конвекция при нормальном давлении и тепловое излучение [12]. Пример нестационарной тепловой модели ТТ приведен на рисунке 2 б.

Математическая модель

Для нестационарной задачи в плоскопараллельной постановке исходное уравнение теплопроводности (1) с учетом сформулированных ограничений можно записать в виде:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_0 \quad (1)$$

где: c_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность материала; λ_x, λ_y – коэффициенты теплопроводности; q_o – теплопроизводительность единицы объема источников (стоков) тепловой энергии; T – температура; x, y – координаты.

Для разработанной базовой тепловой модели использовались следующие начальные и граничные условия:

1) В начальный момент времени для ребер всех тел, входящих в модель, задавалось постоянство температуры [12]:

$$T_{i,t=0} = T_c = \text{const} \quad (2)$$

2) Для всех ребер ИИТП с учетом изотермичности поверхности задавалось условие первого рода [12]:

$$T = T_n \quad (3)$$

3) На ребрах корпуса модели ТТ задавалось условие третьего рода, которое описывает как конвективный, так и лучистый теплообмен с окружающей средой [12]:

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=\pm L_1/2, L_2/2} = \alpha_k (T - T_c) - \beta (T^4 - T_c^4) \quad (4)$$

$$n \rightarrow \{x, y\}$$

где: β – величина, равная произведению постоянной Стефана-Больцмана ($\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴) на коэффициент излучательности поверхности материала зонда; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекции. Численные значения коэффициента α_k были получены из предварительных расчетов с использованием известного метода подобия [12]. Отвод теплового потока через кондуктивные связи крепежа ТТ не учитывался.

Система уравнений (1-4) решалась численным методом (метод конечных элементов) на ПЭВМ [13]. При этом учитывались температурные зависимости коэффициентов теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y = f(T)$ и теплоемкостей $c_p = f(T)$ материалов конструкции ТТ.

Результаты исследований

Классификация компьютерной модели

В соответствии с ГОСТ Р 57700.22-2020 разработанная в данной работе КМ теплового поля ТТ была классифицирована по признакам приведенным в таблице 2.

Таблица 2. Классификация КМ теплового поля ТТ

Признак	Класс	Характеристика
по используемой в КМ математической модели	численная	Описывает свойства и поведение теплового поля ТТ системой уравнений, решение которых осуществляется с использованием методов вычислительной математики - методов конечных элементов

по структуре	составная (комплексная)	Состоит из взаимосвязанных CAD, тепловой и математической моделей, описывающих один объект моделирования - тепловое поле ТТ (по ГОСТ Р 57412)
по назначению	модель инженерного анализа	Предназначена для описания свойств и поведения теплового поля ТТ с учетом физических процессов
по степени приближения представления	точная	Используется при проведении виртуальных экспериментов (например, реализуется метод скользящей изотермы)
по совокупности исследуемых свойств	простая	Исследуется морфология теплового поля ТТ
по пространственной размерности области моделирования	двумерная	Моделируется динамика изменения изотермических поверхностей на двумерной плоскости
по способу дискретизации по пространственным переменным	конечно-элементная	
по методам решения дифференциальных уравнений	детерминистская	
по зависимости свойств КМ от времени	нестационарная (динамическая)	Моделируются нестационарные «переходные» процессы работы ТТ
по моделируемому физическому процессу	КМ теплопроводности	
по скорости выполнения моделирования КМ	Работает не в реальном масштабе времени	
по использованию результатов моделирования	при разработке ТТ и проведении их испытаний	

Визуализация морфологии теплового поля ТТ. Примеры

Была выполнена серия расчетов, которые позволили визуализировать морфологию теплового поля ТТ и выявить влияние дефектов пассивного и активного типа на группы определяющих геометрических характеристик в виде: расстояния от центра ТТ (ИИТП) до фронта изотермической линии (L); периметра (длины) контура изотермической линии (Γ); площади поверхности ТТ в пределах изотермической линии (S), а также коэффициентов асимметрии по перечисленным признакам. Примеры результатов исследований приведены на рисунках 3, 4.

В качестве обобщающего результата следует отметить предельные значения группы определяющих геометрических характеристик теплового поля ТТ с дефектами, которые представлены в таблице 3.

В рамках проведенных компьютерных экспериментов они показывают, что выбранная группа характеристик L , Γ , S проявляет значимую чувствительность к локальным искажениям теплового поля ТТ.

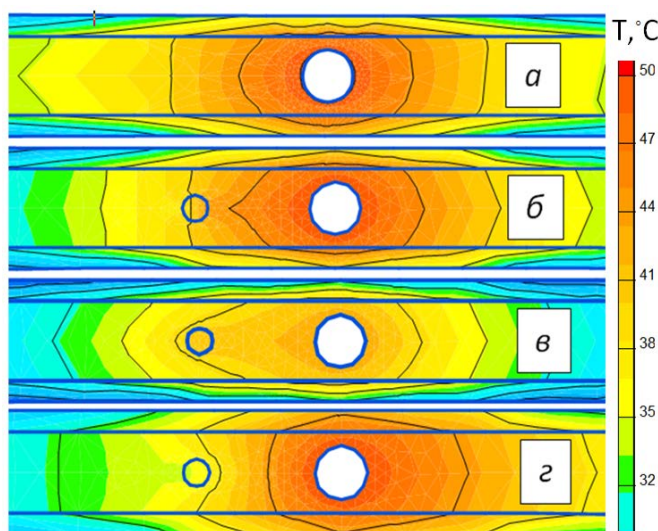


Рисунок 3. Морфология теплового поля в режиме изолиний профильной ТТ в условиях импульсного фотонного нагрева: температура ИИТП $T_{и} = 50^{\circ}\text{C}$, $\tau = 0,5$ с. ПО «ELCUT».

а – ТТ без искусственных дефектов;
б – ТТ с пассивным дефектом (воздушная пора);
в – ТТ с дефектом ИТП, $q = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^3$;
г – ТТ с дефектом СТП, $q = -5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^3$

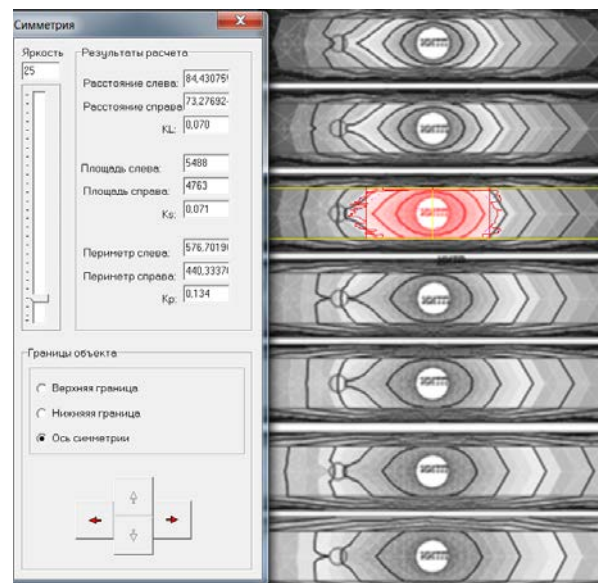


Рисунок 4. Компьютерная технология измерения группы геометрических характеристик теплового поля ТТ. ПО «Пласт1.0».

Пример: ТТ с дефектом корпуса в виде воздушной поры

Таблица 3. Предельные относительные значения геометрических характеристик теплового поля ТТ с дефектами круглой формы ($d = 2$ мм) в режиме скользящей изотермы. Пример

Геометрические характеристики теплового поля		Тип дефекта		
		Пассивный	ИТП	СТП
Расстояние от центра ТТ до фронта изотермы $\Delta L/L, \%$	min	9	16,6	0,38
	max	24	66,3	79,7
Коэффициент асимметрии, A^L_s	max	0,14	0,249	0,663
Периметр изотермы $\Delta \Pi/\Pi, \%$	min	1,0	4,7	0,39
	max	14	31,9	79,7
Коэффициент асимметрии, A^{Π}_s	max	0,075	0,082	0,663
Площадь поля внутри изотермы $\Delta S/S, \%$	min	9,3	14,7	0,0
	max	24,0	66,4	79,7
Коэффициент асимметрии, A^S_s	max	0,137	0,249	0,663

Проверка адекватности компьютерной модели

Была рассмотрена КМ, характеризующая зависимость коэффициентов асимметрии (Y_i) температурного поля ТТ от условной яркости (X).

Y_i – коэффициенты асимметрии по признакам: A^L_S , A^P_S , A^S_S ;

X - условная яркость $B_{\text{усл}}$ определяет границы температурного поля (ПО «Пласт1.0»).

При проведении расчетов использовались предварительно обработанные статистические данные (средние значения), полученные на основании экспериментов натурального - партии из десяти ТТ (пять штук эталонных и пять штук с пассивными дефектами корпуса) и компьютерного эксперимента. Выборки по условной яркости для каждой ТТ составляли двадцать значений.

Для оценки гипотезы об адекватности КМ применялась известная методика с использованием критерия Фишера [14]. Расчеты выполнялись с помощью ПО «Microsoft Excel – 2010». Пример расчетов приведен в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчетов для оценки адекватности КМ теплового поля ТТ с пассивным дефектом корпуса по критерию Фишера

№ п/п	Показатели	1			2		
		Эксперимент			Модель		
		A^L_S	A^S_S	A^P_S	A^L_S	A^S_S	A^P_S
1	r	20	20	20	20	20	20
2	$f_{\text{эксн}} = r - 1$	19	19	19	19	19	19
3	$S_{\text{эксн}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^r (y_i - \bar{y})^2}{f_{\text{эксн}}}$	0,0503	0,0502	0,0151	0,0309	0,0366	0,0623
4	$F_{f_{\text{теор}}, f_{\text{эксн}}} = \frac{S_{\text{теор}}^2}{S_{\text{эксн}}^2}$	1,6284	1,3711	0,2424	-	-	-
5	$F_{\text{кр}}$	2,63					
6	$F_{f_{\text{теор}}, f_{\text{эксн}}}, F_{\text{кр}}$	<	<	<			
7	Адекватность	да	да	да			

Результаты проверки адекватности КМ по критериям Фишера демонстрируют высокую степень достоверности разработанных моделей.

Вывод

В рамках бесконтактной технологии диагностики качества профильных ТТ с симметричной структурой по коэффициенту асимметрии разработана новая компьютерная модель теплового поля ТТ, отличающаяся условием нагрева ТТ поверхностным источником теплового потока, индуцированным светом и использованием физических моделей латентных дефектов пассивного и активного типов, локализованных в корпусе между ребрами и обеспечивающая объективность трактовки информации (сигнала) при тепловизионной диагностики качества.

Список литературы

1. Боев С. Ф., Савченко В. П. Инновационные решения при разработке станций дальнего обнаружения метрового диапазона // Радиооптические технологии в приборостроении: сборник докладов научно-технической конференции, п. Небуг, Краснодарский край, 1-7 сентября. 2013. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. С. 4-10.
2. Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи: техническая энциклопедия. В 2-х кн. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 728 с.
3. Боев С. Ф., Рахманов А. А., Линкевичиус А. П., Якубовский С. В., Володин П. В. Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. 2020. 5. 35-48. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48
4. Поздышев В. Ю., Якубовский С. В., Зюзин А. В., Тимошенко А. В. Обнаружение радиолокационных целей на фоне активных помех по определителю поляризационной матрицы рассеяния // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. 14(9). 4-9. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-9-4-9
5. Савченко В. А. Основы теории надежности и диагностика. Рязань: РВАИ, 2005. 410 с.
6. Поляков П. О. Обеспечение тепловых режимов радиолокационных систем летательных аппаратов с применением плоских тепловых труб: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2020. 20 с.
7. Крахин О. И., Радченко В. П., Венценосцев Д. Методы создания системы отвода тепла теплонагруженных частей ФАР // Радиотехника. 2011. 10. 88-94.
8. Гончаров К. А., Двирный В. В. Опыт разработки и применения тепловых труб для космических аппаратов в научно-производственном объединении имени С. А. Лавочкина // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2008. 1(18). 123-127.
9. Карачинов В. А., Петров Д. А., Килиба Ю. В. Анализ методов контроля качества тепловых труб // Вестник НовГУ. 2019. 2(114). 14-18. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.2(114).14-18
10. Карачинов В. А., Петров Д. А., Килиба Ю. В., Ионов А. С. Патент № 2685804 Российская Федерация, МПК F28D 15/02(2006.01), G01M 3/20 (2006.01). Способ контроля качества тепловой трубы: № 2018116914: заявл. 05.07.2018: опубл. 04.23.2019 / Патентообладатель АО «ОКБ-Планета». 9 с.
11. Petrov D. A., Karachinov V. A. Modeling the influence of heat sinks on the morphology of the temperature field of a profile heat pipe // Journal of Physics: Conference

Series. 2022. 2388. 012118. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012118

12. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – Москва: Радио и связь. 1984. 47 с.

13. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя. Версия 6.6. Санкт-Петербург: ООО «Тор». Санкт-Петербург, 2018. 291 с. URL: https://elcut.ru/downloads/manual_r.pdf. (Дата обращения: 01.11.2023).

14. Андронов А. М., Копытов Е. А., Гринглаз Л. Я. Теория вероятностей и математическая статистика. Санкт-Петербург: Питер, 2004. 461 с.

References

1. Boev S. F., Savchenko V. P. Innovatsionnye resheniia pri razrabotke stantsii dal'nego obnaruzheniia metrovogo diapazona [Innovative solutions in the development of the VHF early-warning stations] // Radioopticheskie tekhnologii v priborostroenii: sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Proc. Sci. Thech. Conf. "Radio-optical technologies in instrumentation"]. Moscow, Bauman University Publishing House, 2013. P. 4-10.

2. Belous A. I., Merdanov M. K., Shvedov S. V. SVCh-elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi [Microwave electronics in radar and communication systems]. In 2 vols. Moscow, TEKhNOSFERA Publ., 2016. 728 p.

3. Boev S. F., Rakhmanov A. A., Linkevichius A. P., Iakubovskii S. V., Volodin P. V. Sozdanie i ekspluatatsiia radiolokatsionnykh stantsii dal'nego obnaruzheniia [Creation and operation of long-range detection radar] // Voprosy radioelektroniki. 2020. 5. 35-48. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48

4. Pozdyshev V. Iu., Iakubovskii S. V., Ziuzin A. V., Timoshenko A. V. Obnaruzhenie radiolokatsionnykh tselei na fone aktivnykh pomekh po opredelitel'iu poliarizatsionnoi matritsy rasseianiia [Detection of radar targets on the background of active interference by the detector of the polarization matter of the scattering] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. 2020. 14(9). 4-9. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-9-4-9

5. Savchenko V. A. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika [Fundamentals of reliability theory and diagnostics]. Ryazan, RVAI Publ., 2005. 410 p.

6. Poliakov P. O. Obespechenie teplovykh rezhimov radiolokatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov s primeneniem ploskikh teplovykh trub [Providing thermal modes of radar systems of aircraft using flat heat pipes]. Moscow, MAI Publ., 2020. 20 p.

7. Krakhin O. I., Radchenko V. P., Ventsenostsev D. Metody sozdaniia sistemy otvoda tepla teplonagruzhennykh chastei FAR [Methods of creation of heat removal system of phased array antenna heatloaded parts] // Radiotekhnika. 2011. 10. 88-94.

8. Goncharov K. A., Dvirnyi V. V. Opyt razrabotki i primeneniia teplovykh trub dlia kosmicheskikh apparatov v nauchno-proizvodstvennom ob"edinenii imeni S. A. Lavochkina [Experience of development and application of heat pipes for space vehicles at S. A. Lavochkin's Scientific-Industrial Enterprise] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva. 2008. 1(18). 123-127.

9. Karachinov V. A., Petrov D. A., Kiliba Iu. V. Analiz metodov kontrolya kachestva teplovykh trub [Analysis of quality control methods of heat pipes] // Vestnik NovSU. 2019. 2(114). 14-18. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.2(114).14-18

10. Karachinov V. A., Petrov D. A., Kiliba Iu. V., Ionov A. S. Sposob kontrolya kachestva teplovoi truby [Method of quality control of a heat pipe]. Patent RF, no. 2685804, 2019.

11. Petrov D. A., Karachinov V. A. Modeling the influence of heat sinks on the morphology of the temperature field of a profile heat pipe // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2388. 012118. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012118
12. Dul'nev G. N. Teplo- i massoobmen v radioelektronnoi apparature [Heat and mass transfer in electronic equipment]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1984. 247 p.
13. ELCUT. Modelirovanie dvumernykh polei metodom konechnykh elementov. Rukovodstvo pol'zovatel'ia. Versiia 6.6 [ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. User's Guide. Version 6.6]. Saint Petersburg, LLC "Tor" Publ., 2018. 291 p. Available at: https://elcut.ru/downloads/manual_r.pdf (Accessed: 01.11.2023)
14. Andronov A. M., Kopytov E. A., Gringlaz L. Ia. Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. 461 p.

Информация об авторах

Карачинов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, эксперт, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru

Петров Дмитрий Александрович – соискатель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; инженер, ОАО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0004-5133-9829, petrovda@okbplaneta.ru

Шергин Степан Сергеевич – магистр, аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого; сотрудник, АО «Аскольд» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-3250-1929, stepan.shergin@mail.ru

Гаверушко Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru

Быстров Николай Егорович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-1998-8868, Nikolay.Bystrov@novsu.ru

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru