

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.7.013

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

ГРНТИ 31.15.33

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОСЕВОЙ АСИММЕТРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Шергин С. С.¹, Скрыпов М. А.²

¹ АО «Аскольд» (Арсеньев, Россия)

² НПО «КВАНТ» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Современные тепловые трубы являясь специальными устройствами охлаждения, эффективно обеспечивают непрерывный отвод тепловой энергии. В настоящее время в РЭС широкое применение получил класс тепловых труб, корпуса которых изготовлены в виде профилей специальной конструкции из алюминиевых сплавов. В статье рассматривается новая методика диагностики качества тепловых труб с симметричной структурой по коэффициенту асимметрии. Экспериментально показано, что методы коэффициента асимметрии и коэффициента формы изотерм, адаптированные к диагностике качества тепловых труб с симметричной структурой, позволяют идентифицировать асимметрию теплопередачи при наличии латентных дефектов структуры тепловых труб.

Ключевые слова: топология, тепловая труба, изотерма, коэффициент асимметрии, теплоноситель

Для цитирования: Шергин С. С., Скрыпов М. А. Радиофизические методы идентификации осевой асимметрии теплопередачи в замкнутых системах с локализованными фазовыми переходами // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 108-122. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

Research Article

RADIOPHYSICAL METHODS OF IDENTIFICATION OF AXIAL ASYMMETRY OF HEAT TRANSFER IN CLOSED SYSTEMS WITH LOCALIZED PHASE TRANSITIONS

Shergin S. S.¹, Skrypov M. A.²

¹ JSC "Ascold" (Arsentev, Russia)

² NPO "KVANT" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract Modern heat pipes (HP), being special cooling devices, effectively ensure the continuous removal of thermal energy. Currently, the HP class is widely used in RES, the housings of which are made in the form of profiles of a special design made of aluminum alloys. The article discusses a new technique for diagnosing the quality of HP with a symmetrical structure by the asymmetry coefficient. It has been experimentally shown that the methods of the asymmetry coefficient and the isotherm shape coefficient, adapted to the diagnosis of the quality of heat pipes with a symmetrical structure, make it possible to identify the asymmetry of heat transfer in the presence of latent defects in the HP structure.

Keywords: heat pipe, isotherm, coefficient of asymmetry, coolant

For citation: Shergin S. S., Skrypov M. A. Radiophysical methods of identification of axial asymmetry of heat transfer in closed systems with localized phase transitions // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 108-122. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

Введение

Известно, что тепловые трубы (ТТ) относятся к классу устройств в герметичных оболочках, внутри которых протекают многочисленные физико-химические процессы, а базовыми являются локализованные фазовые переходы в виде испарения и конденсации теплоносителя [1-3]. К настоящему времени благодаря широкому внедрению технологий на основе ТТ в различные сферы жизнедеятельности человека накоплен и обобщен значительный объем сведений, отражающий влияние технологических и эксплуатационных факторов на надежность и важнейшие характеристики ТТ [4-6]. В то же время следует отметить, что технология производства и сборки ТТ в различных фирмах постоянно изменяется, также как и методы контроля качества технологических операций, а это требует не только уточнения роли таких известных факторов, как материал корпуса, химический состав теплоносителя, но и совершенствование методов диагностики [7-9].

Следует отметить, что при разработке методик диагностики качества изделий различного назначения в герметичных оболочках, предпочтение отдается неразрушающим методам [10]. Необходимо также подчеркнуть, что для ТТ нет универсальных методов и такое положение связано прежде всего с широкой номенклатурой данных изделий, технологией изготовления и сборки, принципами работы, типами дефектов, условиями эксплуатации и др. В роли тестирующего сигнала часто выступает электрический ток, электромагнитные и ультразвуковые волны [7]. Среди них класс оптических методов обладает повышенной информативностью особенно в связи с развитием тепловизионной, лазерной техники, возможностью проведения измерений характеристик теплового поля ТТ в реальном масштабе времени с использованием в роли функции качества коэффициентов асимметрии или коэффициента формы изотерм [10-14]. Изучению этих вопросов и посвящена данная работа.

Методика исследований

В процессе выполнения НИР был разработан и изготовлен лабораторный измерительный стенд, структурная схема которого приведены на рисунке 1. Он включал рабочий стол с регулируемым уровнем, на который устанавливалась исследуемая ТТ (1). Для защиты ТТ от внешних засветок использовался кожух (бокс). Контроль теплового состояния ТТ и ИИТП осуществлялся как контактным, так и бесконтактным методами, в которых применялись измерители температуры (2), на основе цифрового вольтметра (МУ-63) с термопарой ТХА (хромель-алюмель), а также ИК – пирометр - Mastech MS6530. Для нестационарного нагрева ИИТП, роль которого выполнял пленочный резистор на ситалловой подложке прямоугольной формы, использовался генератор импульсов (4).

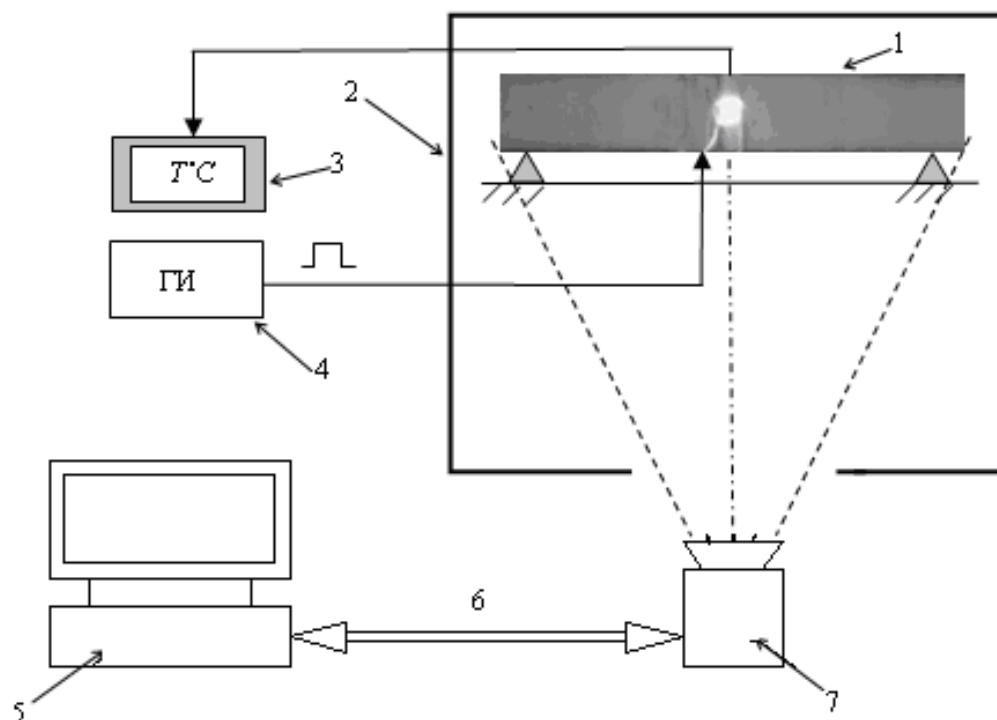


Рисунок 1. Структурная схема измерительного стенда: 1 – Тепловая труба с ИИТП и датчиком температуры; 2 – защитный кожух (экран); 3 – Цифровой, термопарный измеритель температуры; 4 – Генератор импульсов (источник электропитания); 5 – ПЭВМ с ППП; 6 – Канал связи; 7 – Тепловизионная камера

Регистрация теплового, яркостного контраста ТТ осуществлялась с помощью телевизионной измерительной системы (ТИС), включающей: ИК – телевизионную камеру (7) КТП-326Ех (взрывобезопасное исполнение, разработчик – ОАО «НИИ ПТ Растр») на базе неохлаждаемого тепловизионного модуля IR-113); канал связи (6); и ПЭВМ (5) с ПО для ввода и сохранения изображения – «Радуга»; для обработки изображения и проведения измерений коэффициента асимметрии (AS) «Parus 5.0» и соответственно «Парус-Симметрия 1.0»; для обработки изображения и проведения измерений коэффициента формы изотерм «The Geometer's Sketchpad V4» («Живая геометрия»). Расстояние от исследуемой ТТ до входного объектива КТП-326Ех не превышало одного метра. Настройка и калибровка ТИС осуществлялась по макету абсолютно черного тела.

Для повышения достоверности в экспериментах использовались только низкотемпературных ТТ, обладающих симметричной структурой – плоские, а также профильные, которые в последнее время получили массовое распространение [2, 5, 6]. В качестве рабочих жидкостей (теплоноситель) в них использовался спирт, ацетон, аммиак. Такой подход позволял в идеальном случае формировать в исследуемой ТТ от одного ИИТП, расположенного в центре, измерительные сигналы в виде синхронно распространяющихся в противоположных направлениях одинаковых тепловых потоков – принцип реверсивных тепловых потоков. При этом

любые нарушения условий распространения этих потоков во времени и пространстве (дефекты и др. причины) в соответствии с теорией теплопроводности должны приводить к морфологическим изменениям температурных полей, создаваемым этими реверсивными потоками, в частности в корпусе ТТ, а следовательно, только в этом случае возможно формирование тепловых контрастов подлежащих регистрации техническими средствами. После достижения температурного равновесия тепловые контрасты угасали.

Результаты исследований

Метод коэффициента асимметрии

В условиях пускового режима существующие методы обработки тепловизионного изображения профильной тепловой трубы (ТТ) для любого момента времени позволяют выделять температурный срез в виде изотермической линии определенной формы [15]. Этот факт, при центральном расположении импульсного источника теплового потока (ИИТП) на трубе, задачу оценки ее качества сводит к проблеме сравнения геометрических фигур, образованных данными изолиниями. При этом роль функционального показателя качества (критерия) ТТ отводится коэффициенту асимметрии A_S по соответствующему признаку L , Π , S , информативность которых была подтверждена в предыдущих наших работах [7, 8, 12]. Такая изопериметрическая задача широко распространена в настоящее время и остается актуальной в математике, механике сплошных сред, теплофизике, строительной механике и др., где объектами исследований являются, например, оболочки и полости, стержни, пластины и мембраны и т.п. Известно, что коэффициент асимметрии (A_S , *skewness*) согласно теории вероятности - величина, характеризующая асимметрию распределения случайной величины в практических расчетах дает возможность определить не только величину асимметрии, но и проверить наличие асимметрии в генеральной совокупности.

При решении инженерной задачи диагностики качества ТТ в условиях реального производства, как разновидности изопериметрической задачи, на первое место выступает методика построения классификатора.

Режим скользящей изотермы позволяет осуществлять измерение выбранных признаков для конкретной изотермической линии с левой и правой стороны ТТ относительно центра в течении действия греющего теплового импульса. Чтобы удобнее было сравнивать между собой оценки для разных признаков, величина асимметрии учитывалась в относительных единицах. Для этого модуль разности между оценками признаков слева (L_i) и справа (R_i) делился на сумму этих же оценок:

$$A_{Si} = |L_i - R_i| / |L_i + R_i| \quad (1)$$

Необходимо отметить, что предельным значениям коэффициента асимметрии согласно (1), соответствуют положения изотерм в ТТ, приведенные на рисунке 2.

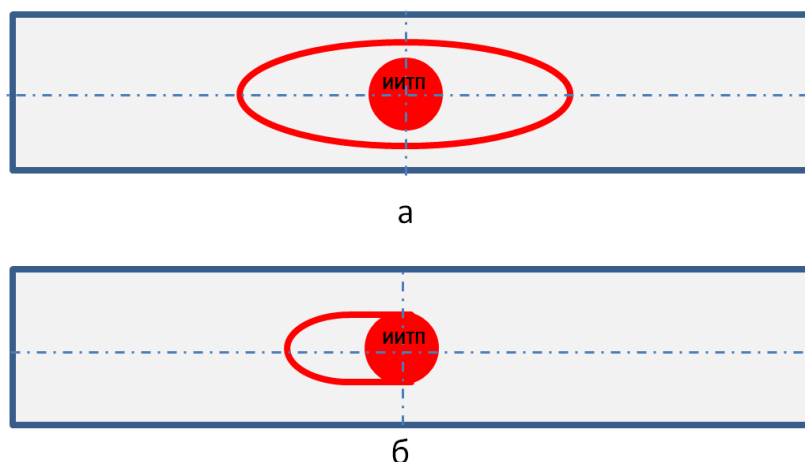


Рисунок 2. Модельное представление изотерм в ТТ для предельных значений коэффициента асимметрии. Пример. а - $A_S = 0$; б - $A_S = 1$

На основе проведенных исследований была разработана методика расчета коэффициентов асимметрии по признакам, включающая следующие процедуры:

а) измерение количественных характеристик признаков L , Π , S слева и справа от центра ТТ;

б) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку L в соответствии с выражением:

$$A_S^L = \frac{|L_L - L_P|}{|L_L + L_P|}, \quad (2)$$

где L_L и L_P – расстояние от центра изотермы для левой и правой части соответственно.

в) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку Π в соответствии с выражением:

$$A_S^\Pi = \frac{|\Pi_L - \Pi_P|}{|\Pi_L + \Pi_P|}, \quad (3)$$

где Π_L и Π_P – периметр изотермы для левой и правой части соответственно;

г) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку S в соответствии с выражением:

$$A_S^S = \frac{|S_L - S_P|}{|S_L + S_P|}, \quad (4)$$

где S_L и S_P – площадь изотермы для левой и правой части соответственно.

Алгоритм разбраковки ТТ приведен на рисунке 3.

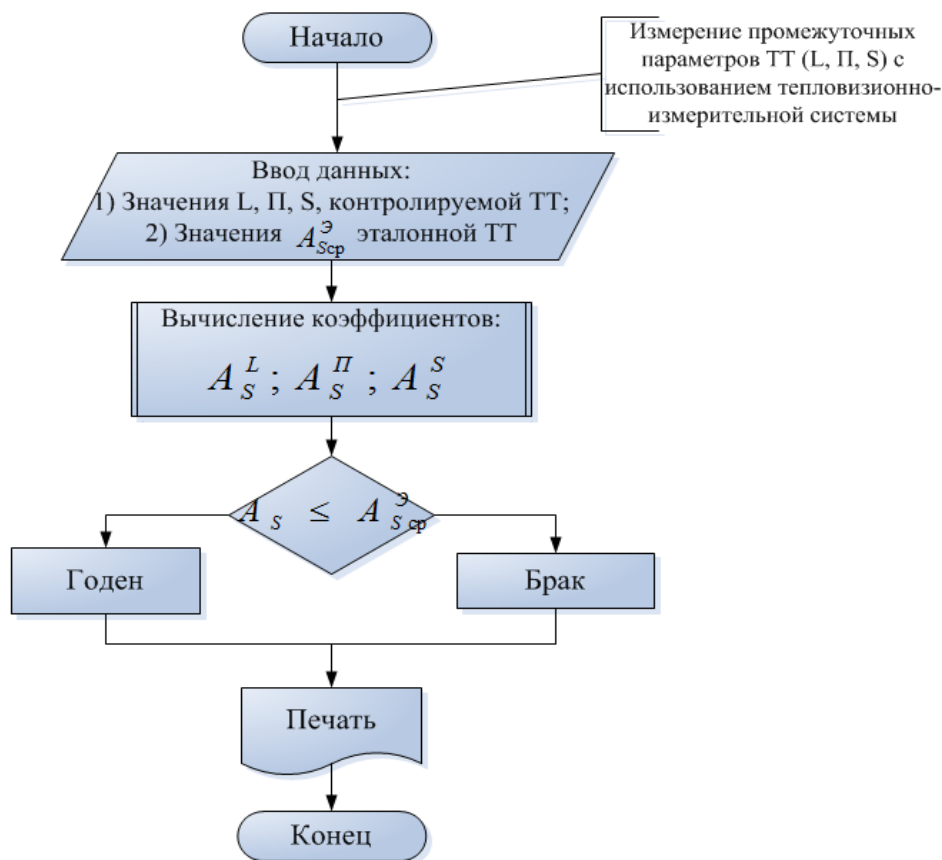


Рисунок 3. Алгоритм разбраковки ТТ

Как было показано в [12], выбранные признаки (L , Π , S) в конкретный момент времени действия теплового импульса обладают различной чувствительностью по отношению к типу присутствующего дефекта в ТТ, то целесообразно в процессе диагностики использовать соответствующие коэффициенты асимметрии A_S^L , A_S^{Π} , A_S^S без усреднения.

При построении классификатора использовался принцип “эталонной тепловой трубы” значения соответствующих коэффициентов асимметрии A_S^L , A_S^{Π} , A_S^S которой принимались за критерии. Тогда в первом приближении разбраковка конкретного типа ТТ по двум классам осуществлялась по условию:

- 1) $\{A_S^I\} > \{A_{S\varphi}^I\}$ – Класс-1, ТТ без дефекта;
 - 2) $\{A_S^I\} \leq \{A_{S\varphi}^I\}$ – Класс-2, ТТ с дефектом.
- где $\{A_S^I\} = \{A_S^L, A_S^{\Pi}, A_S^S\}$.

Расчет коэффициента асимметрии изотерм ТТ. Пример

Для проведения экспериментальных исследований использовались алюминиевые (АД31) ТТ (партия из пяти штук, №АТТ.010.06 ÷ 010.10) с габаритными размерами, $L_1 \times L_2 = 390 \times 30$ мм и максимальной теплотранспортной способностью $P \leq 120$ Вт, изготовленные в лаборатории Тепловых труб Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Дополнительно в корпусах двух ТТ на оси были изготовлена по одной поры в виде круглого глухого отверстия диаметром $d \approx 3$ мм и глубиной $h \approx 0,8$ мм., средой заполнения пор был воздух.

Для организации симметричных реверсивных тепловых потоков осуществлялась разметка ТТ с целью определения положения центра и области для установки ИИТП. Разметка осуществлялась по линейке с точностью $\pm 0,5$ мм.

С целью увеличения коэффициента излучения алюминиевой поверхности в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 8 \div 14$ мкм. Применялись черная тушь, черный матовый лак, сажа и пленки, а также пескоструйная обработка, которые, согласно справочным данным, обеспечивали значения коэффициента излучения не ниже $\varepsilon_\lambda \approx 0,96$. Толщина наносимых слоев не превышала 50 мкм.

Пленочный нагреватель с резистивным слоем на ситалловой подложке, выполняющий функции импульсного источника теплового потока, для уменьшения контактного теплового сопротивления крепился к поверхности ТТ через слой теплопроводящей пасты типа КТП-8. Для уменьшения потерь теплового потока в окружающую среду, поверхность нагревателя теплоизолировалась.

Для оценки осевой асимметрии теплопередачи в ТТ была реализована методика измерений с использованием ПО «Парус-Симметрия», при которой с помощью задатчика уровня последовательно через пять делений устанавливались значения (у.е.) яркости, начиная с уровня 90 (визуализировалась изотерма на минимальном расстоянии от границ ИИТП (рисунок 4)) до уровня со значением 125 (исключалось влияние краевых эффектов), и соответственно, вычислялись значения коэффициентов асимметрии по признакам [12].

В таблице 1 приведены примеры выполненных измерений. Анализ полученной статистики показал, что для ТТ, изготовленной промышленным способом и не содержащей специально введенные дефекты, коэффициенты асимметрии по признакам преимущественно оказываются отличными от нуля и их значения изменяются во втором знаке после запятой. Кроме того, в рамках двухуровневого критерия ($\min \div \max$) они имеют близкие значения в группах с одинаковой яркостью. Следует обратить внимание на то, что ни один из коэффициентов асимметрии не превысил значения 0,09.

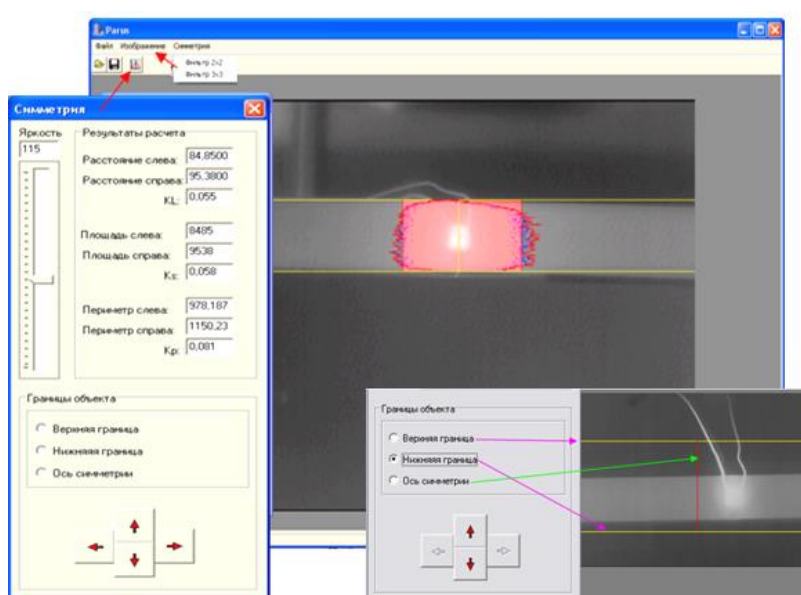


Рисунок 4. Главное окно программы “Парус-Симметрия”. Фото

Таблица 1. Результаты вычислений коэффициентов асимметрии. Эксперимент. Пример. Ацетоновые ТТ

Время, т, с	Яркость, у.е.	A^L_s	A^S_s	A^{Π}_s
Тепловая труба без дефекта корпуса				
50	90	0,064	0,064	0,030
	95	0,060	0,063	0,028
	100	0,058	0,063	0,018
	105	0,030	0,033	0,051
	110	0,026	0,029	0,043
	115	0,019	0,023	0,002
	120	0,010	0,012	0,027
	125	0,012	0,013	0,049
Тепловая труба с дефектом корпуса				
50	90	0,143	0,146	0,012
	95	0,153	0,158	0,064
	100	0,135	0,138	0,077
	105	0,151	0,153	0,019
	110	0,105	0,108	0,029
	115	0,117	0,120	0,074
	120	0,115	0,116	0,058
	125	0,112	0,115	0,068

Для ТТ, содержащих специально введенный дефект корпуса, коэффициенты асимметрии по признакам претерпевают существенные изменения (таблица 1). Их значения не менее чем на порядок превышают аналогичные для ТТ при отсутствии в ней дефекта. Такая же ситуация возникает и при сравнении коэффициентов асимметрии на уровне предельных значений (с учетом возможных

выбросов). Причем на уровне “Min” два коэффициента асимметрии A^L_S и A^S_S превысили значения 0,09. Следует также отметить, что максимальные значения коэффициентов асимметрии регистрировались при положении фронта изотермы до места локализации дефекта.

Метод коэффициента формы

Известно, что для сравнения геометрических фигур правильной формы часто используются достаточно простые критерии: например, число сторон, площадь, периметр, смежные углы и др. [16-18]. В то же время эти критерии становятся бесполезными при сравнении фигур различных классов, в связи с чем в прикладных задачах наибольшее распространение получил критерий в виде коэффициента формы K_f (интегральная характеристика формы фигур, “crest factor” – англ.), приведенный на рисунке 5.

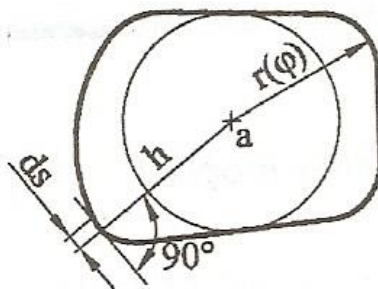


Рисунок 5. Изображение произвольной выпуклой области

Интеграл по контуру заданной фигуры

$$K_{fa} = \oint_L \frac{ds}{h}, \quad (5)$$

где ds – линейный элемент контура области – является количественной характеристикой формы области и называется коэффициентом формы.

Из ряда известных изопериметрических свойств коэффициента формы наиболее важное значение для решения поставленной задачи представляет возможность количественной оценки формы геометрических фигур как с выпуклым, так и вогнутым контуром. Это свойство применительно к обработке изображения морфологии теплового поля ТТ в режиме изолиний может выступать в роли критерия при оценке их симметричности. В таблицах 2 и 3 приведены базовые модельные округлые и гранные формы импульсных источников теплового потока, которые довольно часто в виде ЭРЭ активного с целью отвода от них тепла или служат зоной подвода теплового потока при известных методах диагностики качества ТТ [15]. В этом случае, как показали предварительные исследования,

выбор соответствующей формы ИИТП позволяет формировать тепловые измерительные сигналы изотермического типа наиболее чувствительных к наличию определённых структурных дефектов ТТ. Ниже приведен пример такой технологии.

Таблица 2. Базовые округлые формы импульсных источников теплового потока

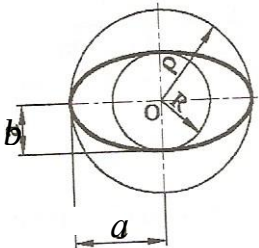
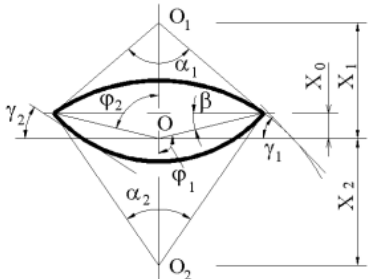
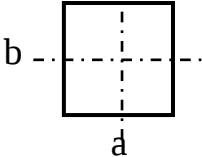
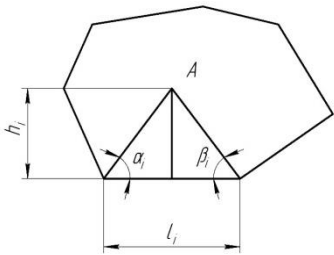
Округлая форма ИИТП	Коэффициент формы	
	Эллипс	$K_f = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$
	Несимметричная круговая луночка	$K_{fa} = 2 \left\{ \frac{\pi - \arctg(\sin \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_1} + \frac{\arctg(\sin \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_2} \right\}.$

Таблица 3. Базовые гранные формы импульсных источников теплового потока

Гранная форма ИИТП	Коэффициент формы	
	Прямоугольник (квадрат)	$K_f = \frac{4}{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}$ Для квадрата $a = b$
	Полигональная фигура	$K_{fa} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_i)$ $= \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_{i-1})$ n – число сторон

Расчет коэффициента формы изотерм ТТ. Пример

Для проведения экспериментальных исследований, как и предыдущих опытах, использовалась партия алюминиевых ацетоновых труб, прошедших необходимую технологическую подготовку: разметка, изготовление дефекта-поры, чернение, посадка гранного (квадратной формы) ИИТП.

С помощью ТИС регистрировались яркостные контрасты теплонагруженных ТТ, которые подвергались цифровой обработки в ПО “Parus 5.0” с целью визуализации особенностей теплового поля (рисунок 6).

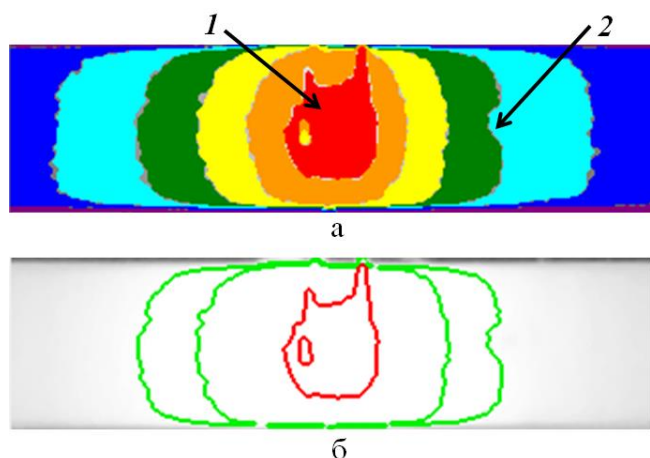


Рисунок 6. Морфология теплового поля ацетоновой тепловой трубы с дефектом корпуса. Гранный ИИТП квадратной формы. Эксперимент. Фото. ПО “Парус - К”: а – режим термографии (1 – ИИТП; 2 – область дефекта (пора)); б – режим изолиний (контур дефекта $T = 32,5^{\circ}\text{C}$)

Так, в режиме термографии (рисунок 6а) достаточно хорошо визуализировалась система изотермических зон, отличавшихся гомогенностью и с отчетливой областью структурного дефекта ТТ. Режим изолиний (рисунок 6б) позволил получить контурное изображение особенностей теплового поля с дефектом, пригодного для дальнейшей обработки в ПО «Живая геометрия» (рисунок 7).

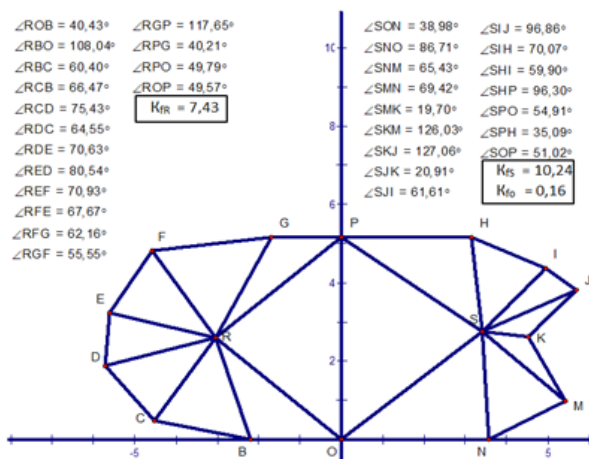


Рисунок 7. Расчет коэффициентов формы изотерм в ацетоновой тепловой трубе с дефектом корпуса. Пример. Эксперимент. Фото. ПО «Живая геометрия»

В рамках использования данной программы был реализован метод разбиения на треугольные элементы и выполнены все необходимые измерения углов, размеров, а также расчеты коэффициентов формы фигур слева и справа от визирной линии ТТ (K_{IR} , K_{IS}) и относительного коэффициента формы (K_{IO}):

$$K_{fo} = \left| \frac{K_{fR} - K_{fS}}{K_{fR} + K_{fS}} \right|, \quad (6)$$

Скольжение выделенных изотерм вдоль продольной оси ТТ во времени сопровождается изменением их формы, в том числе, за счет взаимодействия с латентными дефектами различной природы. Поэтому несомненный интерес представляет характер эволюции коэффициента асимметрии во времени, показанный на рисунке 8. Достаточно хорошо видно, что K_{fo} уже в начальный момент времени (до дефекта) принимает значения больше аналогичного коэффициента для ТТ, не содержащей дефект. А это открывает путь к технологии диагностики качества ТТ.

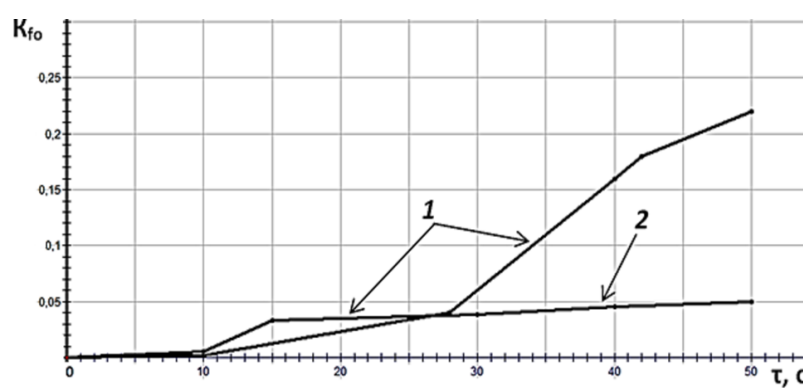


Рисунок 8. Изменение относительного коэффициента формы изотермы во времени. Эксперимент. ПО “Живая геометрия”: 1- ацетоновая тепловая труба с искусственным дефектом корпуса; 2 - ацетоновая тепловая труба без дефекта корпуса

Из анализа полученной статистики значений относительного коэффициента формы изотермы на данном этапе может быть предложен следующий алгоритм:

- при K_{fo} близком к 0 – тепловая труба высокого качества;
- при K_{fo} от 0,01 до 0,1 – тепловая труба среднего качества;
- при K_{fo} больше 0,1 – тепловая труба ниже среднего качества.

Вывод

Экспериментально показано, что методы коэффициента асимметрии и коэффициента формы изотерм, адаптированные к диагностике качества тепловых труб с симметричной структурой, позволяют идентифицировать асимметрию теплопередачи при наличии латентных дефектов структуры ТТ.

Благодарность

Авторы выражают благодарность за организацию эффективной научной деятельности и неоценимую помощь в подготовке материалов данной статьи своему научному руководителю Владимиру Александровичу Карачинову, безвременно ушедшему 04.01.2024.

Список литературы

1. Дан П. Д., Рэй Д. А. Тепловые трубы / перевод с английского Ю. А. Зейгарника. Москва: Энергия, 1979. 272 с.
2. Дульнев Г. Н., Беляков А. П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. Москва: Радио и связь, 1985. 96 с.
3. Карачинов В. А. Защита РЭС в экстремальных условиях. Специальные устройства охлаждения: учебное пособие. Великий Новгород: изд-во НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2007. 176 с.
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Чулков Б. А., Ягодкин И. В. Технологические основы тепловых труб. Москва: Атомиздат, 1980. 160 с.
5. Лукс А. Л., Матвеев А. Г. Исследование высокоэффективных аммиачных тепловых труб энергосберегающих систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата // Вестник Самарского государственного университета. Естественнаучная серия. 2007. 6(56). 401-418.
6. Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Сунцов С. Б. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник Сибирского государственного университета им. М. Ф. Решетнева. 2013. 6(52). 111-116.
7. 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
8. Карачинов В. А., Калиба Ю. В., Петров Д. А., Ионов А. С. Патент № 2685804 Российская Федерация МПК F28D 15/02 (2006.01), G01J5/100 (2006.01). Способ контроля качества тепловой трубы: № 2018116914: заявл. 07.05.2018: опубл. 23.04.2019 / заявитель АО ОКБ-Планета.
9. Карачинов В. А., Петров Д. А., Ионов А. С., Петров Д. А., Евстигнеев Д. А. Патент № 2724316 Российская Федерация МПК G01M 3/20 (2006.01). Способ контроля качества аммиачной тепловой трубы: № 2019136400: заявл. 11.12.2019: опубл. 22.06.2020 / заявитель АО ОКБ-Планета.
10. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общей редакцией В. В. Клюева. Т. 5: в 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / составитель В. П. Вавилов. Москва: Машиностроение, 2004. 679 с.
11. Infrared and Thermal Testing (IR) / editor P. O. Moore // Nondestructive Testing Handbook: 3rd ed. Vol. 3. ASNT, 2001. 732 p.
12. Petrov D. A., Karachinov V. A., Petrov A.V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of thermal imaging method of quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. 734. 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012058
13. Шергин С. С., Карачинов В. А., Осипова И. С. Исследование яркостного контраста профильной тепловой трубы в условиях диагностики качества // Вестник НовГУ. 2020. 5(121). 39-43. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.5(121).39-43
14. 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
15. Карачинов В. А. Патент № 2456524 Российская Федерация МПК F28D 15/02 (2006.01). Способ контроля качества тепловой трубы: № 2010152904/06: заявл. 23.10.2010: опубл. 20.07.2012 / заявитель ОФО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике» (ОАО «СКТБ РТ»).
16. Полия Г., Сеге Г. Изопериметрические неравенства в математической

физике / перевод с английского. Москва: URSS, 2006. 336 с.

17. Коробко В. И., Коробко А. В. Количественная оценка симметрии. Москва: АСВ, 2008. 128 с.

18. Коробко А. В., Шляхов С. В., Лыгина Ю. Е. Определение значений коэффициента формы плоских областей с выпуклым контуром в виде частей круга // Строительство и реконструкция. 2017. 6(74). 13-21.

References

1. Dan P. D., Ray D. A. Teplovyye truby [Heat pipes]. Moscow: Energiya, 1979. 272 p.
2. Dulnev G. N., Belyakov A. P. Teplovyye truby v elektronnykh sistemakh stabilizatsii temperatury [Heat pipes in electronic temperature stabilization systems]. Moscow: Radio and Communications, 1985. 96 p.
3. Karachinov V. A. Zashchita RES v ekstremal'nykh usloviyakh. Spetsial'nyye ustroystva okhlazhdeniya: uchebnoye posobiye [Protection of RES in extreme conditions. Special cooling devices. A study guide]. Veliky Novgorod, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2007. 176 p.
4. Ivanovsky M. N., Sorokin V. P., Chulkov B. A., Yagodkin I. V. Tekhnologicheskiye osnovy teplovykh trub [Technological foundations of heat pipes]. Moscow: Atomizdat, 1980. 160 p.
5. Luks, A. L., Matveev A. G. Issledovaniye vysokoeffektivnykh ammiachnykh teplovykh trub energosberegayushchikh sistem termoregulirovaniya krupnogabaritnykh konstruktsiy kosmicheskogo apparata [Investigation of highly efficient ammonia heat pipes of energy-saving thermal control systems for large-sized spacecraft structures] // Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2007. 6(56). 401-418.
6. Derevyank V. A., Nesterov D. A., Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E., Fatkulov R. F., Suntsov S. B. Ploskiye teplovyye truby dlya otvoda tepla ot elektronnoy apparatury v kosmicheskikh apparatakh [Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles] // Bulletin of SibGAU. 2013. 6(52). 111-116.
7. Karachinov V. A., Petrov D. A., Kiliba Yu. V. [Analysis of quality control methods for heat pipes] // Vestnik NovSU. 2019. 2(114). 14-18.
8. Karachinov V. A., Kiliba Yu. V., Petrov D. A., Ionov A. S. Patent No. 2685804 the Russian Federation IPC F28D 15/02 Sposob kontrolya kachestva teplovoy truby [Method for quality control of a heat pipe] No. 2019136400: application 11.12.2019: publ. 23.04.2019 / applicant JSC OKB-Planeta. 9 p.
9. Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Petrov D. A., Evstigneev D. A. Patent No. 2724316 Russian Federation IPC G01M 3/20 (2006.01). Sposob kontrolya kachestva ammiachnoy teplovoy truby [Method for quality control of ammonia heat pipe] No. 2019136400: application 11.12.2019: publ. 22.06.2020 / applicant JSC OKB-Planeta.
10. Nerazrushayushchiy kontrol' [Non-destructive testing]: reference book: in 7 volumes under the general editorship of V. V. Klyuev. Vol. 5: in 2 books. Book 1: Thermal control. / V. P. Vavilov. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 679 p.
11. Infrared and Thermal Testing (IR) / editor P. O. Moore // Nondestructive Testing Handbook: 3rd ed. Vol. 3. ASNT, 2001. 732 p.
12. Petrov D. A., Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of thermal imaging method of quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. 734, N 1. 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012058
13. Shergin S. S., Karachinov V. A., Osipova I. S. Issledovaniye yarkostnogo kontrasta profil'noy teplovoy truby v usloviyakh diagnostiki kachestva [The study of

brightness contrast of a profile heat pipe in the conditions of quality diagnostics] // Vestnik NovSU. 2020. 5(121). 39-43. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.5(121).39-43

14. 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

15. Karachinov V. A. Patent No. 2456524 Russian Federation IPC F28D 15/02 (2006.01). Sposob kontrolya kachestva teplovoy trubyy [Heat pipe quality control method]: No. 2010152904/06: application 23.10.2010: publ. 20.07.2012 / applicant Joint Stock Company "Special Design and Technology Bureau by relay technology" (JSC "SKTB RT").

16. Polia G and Sege G Izoperimetricheskiye neravenstva v matematicheskoy fizike [Isoperimetric inequalities in mathematical physics] / translated from English. Moscow: URSS, 2006. 336 p.

17. Korobko V. I., Korobko A. V. Kolichestvennaya otsenka simmetrii [Quantitative assessment of symmetry]. Moscow: ASV, 2008. 128 p.

18. Korobko A.V., Shlyakhov S.V., Lygina Yu.E. Opredeleniye znacheniy koeffitsiyenta formy ploskikh oblastey s vypuklym konturom v vide chastey kruga [Determination of the values of the shape coefficient of flat areas with a convex contour in the form of parts of a circle] // Construction and reconstruction. 2017. 6(74). 13-21.

Информация об авторах

Шергин Степан Сергеевич – инженер-конструктор, АО «Аскольд» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-3250-1929, stepan.shergin@mail.ru

Скрыпов Михаил Андреевич – сотрудник, НПО «КВАНТ» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-3816-3147, iellariahe@yandex.ru