

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.7.013:004.93

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).762-772

ГРНТИ 59.41+28.17.33

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ ФОТОННОГО НАГРЕВА 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 В рамках генерации и селекции морфологических признаков теплового поля и информационного принципа были разработаны и реализованы для тепловых труб методики расчета информативности. Первая методика отличается применением энергетического принципа и обеспечивает повышенную чувствительность к локальным искажениям теплового поля профильной тепловой трубы. Вторая методика реализована по методу накопленных частот и Шеннона, отличается применением как теоретических, так и экспериментальных выборок.

Ключевые слова: тепловая труба, температурное поле, признак, методика

Для цитирования: Карачинов В. А., Петров Д. В., Шергин С. С., Гаврушко В. В., Быстров Н. Е., Петров В. М. Анализ информативности морфологических признаков теплового поля в условиях фотонного нагрева тепловых труб // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 762-772. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).762-772

Research Article

ANALYSIS OF THE INFORMATIVE VALUE OF MORPHOLOGY OF THE TEMPERATURE FIELD FOR HEAT PIPES IN CONDITIONS OF PHOTONIC HEATING

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 Within the framework of generation and selection of morphological features of the temperature field and the information principle, methods for calculating informative value have been developed and implemented for heat pipes. The first technique consists in the application of energy principle and provides increased sensitivity to local distortions of the temperature field of a shaped heat pipe. The second technique is implemented using the method of accumulated frequencies and Shannon coding. It is characterized by the use of both theoretical and experimental samples.

Keywords: heat pipe, temperature field, feature, methodology

For citation: Karachinov V. A., Petrov D. V., Shergin S. S., Gavrushko V. V., Bystrov N. E., Petrov V. M. Analysis of the informative value of morphology of the temperature field for heat pipes in conditions of photonic heating // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 762-772. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).762-772

Введение

Важнейшей целью распознавание образов в рамках диагностики качества изделий в гермооболочках является классификация объектов – в нашем случае тепловых труб (ТТ) по нескольким категориям или классам [1-5]. В данном случае под классом следует понимать совокупность множества ТТ, выделенных по какому-либо признаку. Поэтому задача распознавания образов состоит в том, чтобы отнести новый распознаваемый объект к конкретному классу, а именно, ТТ, не содержащая дефект (например, *класс-1*), тогда ТТ, содержащая дефект (*класс-2*). При этом визуализация морфологии теплового поля ТТ как в ходе компьютерного, так и тепловизионного эксперимента и дальнейший переход к количественным оценкам позволяют сформировать вектор признаков или совокупность признаков. Тогда в рамках задачи распознавания, которая для ТТ в данной работе решалась впервые, будет считаться, что каждой ТТ (образу) ставится в соответствие единственное значение вектора признаков и наоборот – каждому значению вектора признаков соответствует единственная ТТ. Следовательно, чтобы классифицировать «неизвестную» ТТ, то есть распознать образ, необходимо будет определить, к какому классу относится ТТ, на основании анализа значений ее признаков.

Вопросам разработки методики решения поставленной задачи и посвящена данная работа.

Методика и результаты исследований

Постадийная методика диагностики качества профильных ТТ

Проведенные нами исследования показали [6, 7], что процедура распознавания образа становится определяющей при диагностике качества профильных ТТ. При этом может быть реализована следующая методика:

Стадия 1: Генерация признаков – выявление признаков, которые наиболее полно описывают морфологию теплового поля ТТ;

Стадия 2: Селекция признаков – выявление признаков, которые имеют наилучшие классификационные свойства для выявления дефектов ТТ;

Стадия 3: Построение классификатора или решающего правила отнесения ТТ к одному из классов (качественная/некачественная) на основании его вектора признаков;

Стадия 4: Оценка классификатора. Нахождение ошибок классификации и оценка эффективности выбранного метода.

Выбор (генерация и селекция) морфологических признаков температурного поля ТТ. Энергетический принцип

Известно, что суть выбора признаков в задаче диагностики качества ТТ заключается в выделении признаков, которые приводят к большим расстояниям между классами и к малым внутри классов [2]. При этом возникает мотивация, направленная на уменьшение вычислительной сложности, которая способствует

сокращению числа признаков. Возможные варианты развития ситуации встречаются в литературе по теории информации [2-5]. Например, наряду с признаками, имеющими низкие классификационные способности, высока вероятность появления двух признаков с почти равными классифицирующими способностями, сильно коррелированных между собой и др.

Анализ морфологии температурного поля профильных ТТ, выполненный методом полевых характеристик, позволил для режима изолиний выделить группу определяющих геометрических характеристик (признаков) в составе: 1) расстояние от центра ТТ (ИИТП) до фронта изотермической линии (L); 2) периметр (длина) контура изотермической линии (Π); 3) площадь поверхности ТТ в пределах изотермической линии (S) [8]. Научный и прикладной интерес для развития диагностических методов представляют исследования, показывающие степень изменчивости данной группы в условиях присутствия в ТТ между ребрами дефектов различного типа. Были проведены целенаправленные компьютерные эксперименты, в ходе которых осуществлялись измерения данных характеристик. Методика измерений включала формирование файлов изображений (формат *.bmp) морфологии температурного поля ТТ в режиме скользящей изотермы и непосредственные измерения с помощью программы «Пласт 1.0» [8-10].

В качестве обобщающего результата исследований следует отметить предельные относительные значения группы определяющих геометрических характеристик ТТ с дефектами (таблица 1).

Таблица 1. Предельные относительные значения геометрических характеристик теплового поля ТТ с дефектами круглой формы в режиме скользящей изотермы. Пример

Тип дефекта круглой формы (диаметр $D = 2$ мм)		Пассивный	Источник теплового потока, ИТП	Сток теплового потока, СТП
Расстояние до фронта $\Delta L/L, \%$	min	9	16,6	0,38
	max	24	66,3	79,7
Периметр $\Delta \Pi/\Pi, \%$	min	1,0	4,7	0,39
	max	14	31,9	79,7
Площадь $\Delta S/S, \%$	min	9,3	14,7	0,0
	max	24,0	66,4	79,7

В рамках проведенных компьютерных экспериментов они показывают, что выбранная группа характеристик L , Π , S проявляет значимую чувствительность к локальным искажениям температурного поля ТТ. В то же время для построения научных основ предложенного метода диагностики ТТ необходимым этапом исследований является обоснование информативности выбранных признаков, что позволит выбрать наиболее важные признаки для составления простого решающего правила по ним и проведения классификации в дальнейшем. С этой целью в работе использовался метод накопленных частот (МНЧ) и метод Шеннона [2].

Расчет информативности морфологических признаков L , P , S методом накопленных частот

Применительно к задаче анализа морфологии температурного поля ТТ сущность метода накопленных частот состоит в том, что если имеются две выборки, например, признака L , принадлежащие двум различным классам – ТТ без дефекта и ТТ с дефектом, то по обеим выборкам в одних координатных осях строятся эмпирические распределения признака L и подсчитываются так называемые накопленные частоты $M_{i,j}$. Согласно [2] накопленная частота показывает, какая доля элементов выборки не превышает данного значения. Накопленные частоты получаются из относительных (является дробным числом из промежутка от 0 до 1 и показывает, какую долю данное значение составляет от всего объема выборки) накопительным суммированием. Последняя накопленная частота всегда равна единице. Необходимо отметить, что накопленные частоты, так же, как и относительные, иногда измеряют в процентах.

Для оценки информативности признака $I(L)$ служил модуль максимальной разности накопленных частот $|M_{1,j} - M_{2,j}|$. Эмпирические и накопленные частоты часто изображаются графически – в виде гистограммы распределения признака L и графиков [2].

Впервые для ТТ была разработана и реализована постадийная методика расчета информативности признаков теплового поля:

Стадия 1: Формирование таблицы исходных данных (таблица 2).

Таблица 2. Численные значения геометрических характеристик теплового поля ТТ

№ объекта	Признак, x_i	1	2	3	4	5	N
Класс-1, ТТ без дефекта	L_{1j} , пикс.	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{1N}
	P_{1j} , пикс.	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{1N}
	S_{1j} , пикс.	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{1N}
Класс-2, ТТ с дефектом	L_{2j} , пикс.	L_{21}	L_{22}	L_{23}	L_{24}	L_{25}	L_{2N}
	P_{2j} , пикс.	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{2N}
	S_{2j} , пикс.	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{2N}

Стадия 2: Построение эмпирических распределений признака x_i по каждой выборке в одних координатных осях:

2.1) Признак L :

2.1.1) Определяются минимальное L_{min} и максимальное L_{max} значения признака L по двум выборкам;

2.1.2) Определяется размах значений признака: $L_{max} - L_{min}$;

2.1.3) Выбирается количество интервалов распределения: n ;

2.1.4) Рассчитывается величина интервала распределения:

$$K = (L_{max} - L_{min}) / n \quad (1)$$

2.1.5) Определяются границы каждого j -го интервала из соотношения:

$$d_j = L_{min} + j \cdot K, \quad (2)$$

где $j = 0, 1, \dots, n$.

2.1.6) Рассчитывается количество попаданий признака L_1 в каждый интервал, исходя из соотношения $d_{j-1} < L_1 \leq d_j$;

2.1.7) Рассчитывается количество попаданий признака L_2 в каждый интервал, исходя из соотношения $d_{j-1} < L_2 \leq d_j$.

Стадия 3: Рассчитывается накопленная частота для класса-1 и текущего интервала M_{1j} :

$$M_{1j} = m_{10} + \sum_{j=1}^n m_{1j}, \quad (3)$$

где: $M_{10} = m_{10}$

Стадия 4: Рассчитывается накопленная частота для класса-2 и текущего интервала M_{2j} :

$$M_{2j} = m_{20} + \sum_{j=1}^n m_{2j}, \quad (4)$$

где: $M_{20} = m_{20}$

Стадия 5: Вычисляется модуль разности накопленных частот $|M_{1j} - M_{2j}|$;

Стадия 6: Определяется информативность признака L из анализа сводной таблицы 3.

Таблица 3. Результаты расчета информативности признака L

№ п/п	Интервалы d_j	Класс-1, ТТ без дефекта		Класс-2, ТТ с дефектом		Информативность $I(L)$ $ M_{1j} - M_{2j} $
		Частоты, m_{1j}	Накопленные частоты, $M_{1,j}$	Частоты, m_{2j}	Накопленные частоты, M_{2j}	
1	$0 \div d_1$	m_{11}	M_{11}	m_{21}	M_{21}	$ M_{11} - M_{21} $
2	$d_1 \div d_2$	m_{12}	$M_{1,2}$	m_{22}	M_{22}	$ M_{12} - M_{22} $
3	$d_2 \div d_3$	m_{13}	M_{13}	m_{23}	M_{23}	$ M_{13} - M_{23} $
...	$\dots \div \dots$	...	...	...	...	...
n	$d_{n-1} \div d_n$	m_{1n}	M_{1n}	m_{2n}	M_{2n}	$ M_{1n} - M_{2n} $

Стадия 7: Построение гистограммы и графиков накопленных частот для признака L .

Аналогичным образом методика реализуется для признаков Π и S .

Пример. Расчет информативности признаков по результатам натурного эксперимента исследования теплового поля ТТ с пассивным дефектом (воздух) корпуса

В этой части работы продемонстрирована методика расчета информативности на примере признака L . Исходные данные, полученные из эксперимента, приведены в таблице 4, а результаты расчета информативности в таблице 5. Дополнительная информация представлена на рисунке 1.

Таблица 4. Средние значения геометрических характеристик теплового поля ацетоновой ТТ с пассивным дефектом (воздух) корпуса

№ объекта	Признак, x_i	1	2	3	4	5	6	7	8
Класс-1, ТТ без дефекта	L_1 , пикс.	30	44	57	66	85	104	135	152
	Π_1 , пикс.	1288	362	338	322	344	384	475	464
	S_1 , пикс.	2398	3442	4465	5165	6683	8214	10659	12004
Класс-2, ТТ с дефектом	L_2 , пикс.	19	30	41	41	64	79	100	115
	Π_2 , пикс.	299	282	305	294	318	348	384	415
	S_2 , пикс.	1496	2404	3233	3225	5034	6260	7909	9104

Таблица 5. Информативность признака L . Расчет

№ п/п	Интервалы	Класс-1, ТТ без дефекта		Класс-2, ТТ с дефектом		$ M_{1j} - M_{2j} $
		Частоты, m_{1j}	Накопленные частоты, M_{1j}	Частоты, m_{2j}	Накопленные частоты, M_{2j}	
1	0÷19	0	0	1	1	1
2	19÷85	1	1	3	4	3
3	85÷151	2	3	0	4	1
4	151÷213	2	5	2	6	1
5	213÷283	2	7	1	7	0
6	283÷349	0	7	1	8	1
7	349÷415	2	9	0	8	1

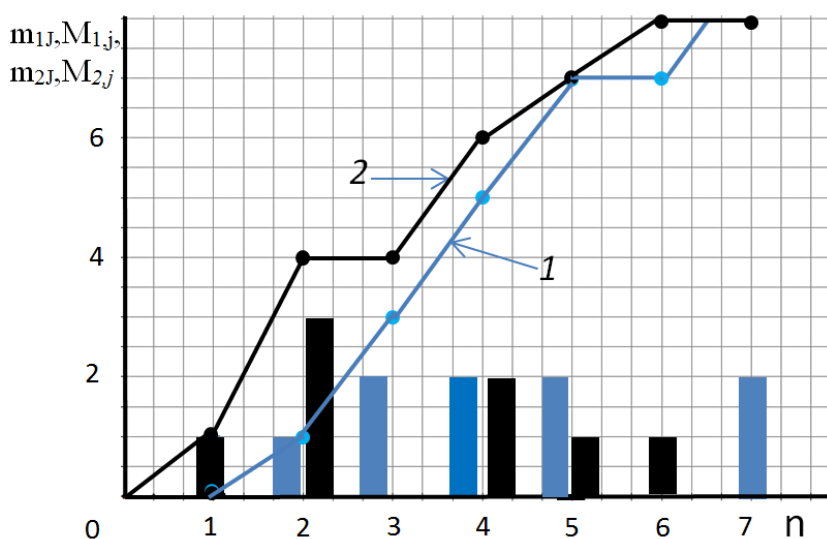


Рисунок 1. Графики и гистограммы распределения эмпирических m_{ij} и накопленных M_{ij} частот для признака L . Пример: Профильная ацетоновая ТТ с пассивным дефектом (воздух) корпуса. (1- класс-1; 2- класс-2). ■ - класс-1 (без дефекта) ■ - класс-2 (с дефектом)

Как следует из таблицы 5, информативность признака L равна трем. В качестве обобщающего результата необходимо отметить полученные с помощью МНЧ значения информативности группы диагностических признаков L , Π , S , представленные в итоговой таблице 6. Наиболее информативный признак определялся по максимальным модулям разности накопленных частот соответствующих классов.

Таблица 6. Информативность диагностических признаков L , Π , S . Пример. Профильная ТТ

№ п/п	Признак, x_i	Информативность, $I(x_i)$					
		Пассивный дефект		Активный дефект, ИТП		Активный дефект, СТП	
		Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	L	0	3	3	-	1	-
2	Π	1	3	3	-	1	-
3	S	1	2	3	-	2	-

Согласно таблице 6 таким признаком являлась площадь поверхности ТТ в пределах изотермической линии (S). Следует также отметить, что оценка информативности признаков по экспериментальным выборкам в МНЧ, показывала более высокие значения модулей, например, для класса с пассивным дефектом ТТ.

Расчет информативности морфологических признаков L , Π , S методом Шеннона

С учетом того, что информативность признаков L , Π , S в МНЧ не является нормированной – она относительная, в данной работе для оценки информативности, как абсолютной величины, предложен и реализован метод Шеннона [2, 9, 10]. Следует отметить, что метод Шеннона дает оценку информативности $I(x_i)$ признаков в виде нормированной величины, которая принимает значения в интервале от нуля до единицы. При этом чем ближе значение $I(x_i)$ к единице, тем выше информативность признака x_i и, наоборот, чем ближе к нулю, тем ниже информативность признака x_i .

Впервые в рамках метода Шеннона для ТТ с центрально локализованным вариантом расположения ИТП была разработана и реализована постадийная методика расчета информативности признаков теплового поля.

Стадия 1: Формирование таблицы исходных значений признаков L , Π , S в двух классах ТТ без дефекта (эталон) (таблица 7).

Таблица 7. Численные значения геометрических характеристик теплового поля ТТ без дефекта

№ объекта	Признак, x_i	1	2	3	4	5	N
Класс-1, ТТ без дефекта (левая часть)	L_{1j} , пикс.	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{1N}
	Π_{1j} , пикс.	Π_{11}	Π_{12}	Π_{13}	Π_{14}	Π_{15}	Π_{1N}
	S_{1j} , пикс.	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{1N}
Класс-2, ТТ без дефекта (правая часть)	L_{2j} , пикс.	L_{21}	L_{22}	L_{23}	L_{24}	L_{25}	L_{2N}
	Π_{2j} , пикс.	Π_{21}	Π_{22}	Π_{23}	Π_{24}	Π_{25}	Π_{2N}
	S_{2j} , пикс.	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{2N}

Стадия 2: Формирование таблицы исходных значений признаков L , Π , S в двух классах ТТ с дефектом (таблица 8).

Таблица 8. Численные значения геометрических характеристик теплового поля ТТ с дефектом

№ объекта	Признак, x_i	1	2	3	4	5	N
Класс-1, ТТ без дефекта	L_{1j} , пикс.	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{1N}
	Π_{1j} , пикс.	Π_{11}	Π_{12}	Π_{13}	Π_{14}	Π_{15}	Π_{1N}
	S_{1j} , пикс.	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{1N}
Класс-2, ТТ с дефектом	L_{2j} , пикс.	L_{21}	L_{22}	L_{23}	L_{24}	L_{25}	L_{2N}
	Π_{2j} , пикс.	Π_{21}	Π_{22}	Π_{23}	Π_{24}	Π_{25}	Π_{2N}
	S_{2j} , пикс.	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{2N}

Стадия 3: Выбор значения критерия равенства $A_s \leq A_{ср}$, ($ср.$ – среднее значение коэффициента асимметрии изотермы по признаку);

Стадия 4: Расчет частоты появления каждой градации j в каждом k классе (m_{jk});

Таблица 9. Результаты расчета частоты появления каждой градации j в каждом k классе ТТ

№ градации признака, j	Значение градации признака	Номер класса	
		Без/деф.(1)	С деф.(2)
		Частоты появления градаций	
1	$L1=L2$ (0)	$m_{11} = \dots$	$m_{12} = \dots$
2	$L1 \neq L2$ (1)	$m_{21} = \dots$	$m_{22} = \dots$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= (m_{11} + m_{12}) / N \\ P_2 &= (m_{21} + m_{22}) / N \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Стадия 5: Вычисление вероятности каждой градации P_j :

Стадия 6: Вычисление вероятности каждой градации в каждом классе $P_{j,k}$

$$\left. \begin{aligned} P_{11} &= m_{11} / (m_{11} + m_{12}) \\ P_{12} &= m_{12} / (m_{11} + m_{12}) \\ P_{21} &= m_{21} / (m_{21} + m_{22}) \\ P_{22} &= m_{22} / (m_{21} + m_{22}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Стадия 7: Определение информативности $I(X_i)$ признаков L, Π, S ;

$$I(X_i) = 1 + P_1(P_{11} \cdot \log_2 P_{11} + P_{12} \cdot \log_2 P_{12}) + P_2(P_{21} \cdot \log_2 P_{21} + P_{22} \cdot \log_2 P_{22}), \quad (7)$$

где: $\log_2 P = \ln P / \ln 2$,

Стадия 8: Формирование итоговой таблицы информативности признаков ТТ (таблица 10).

Таблица 10. Примеры расчета информативности признаков L, Π, S ТТ по результатам экспериментальных исследований

Значение информативности, $I(X_i)$	Признак		
	L	Π	S
	АмТТ: дефект парового канала (штифт)		
	0,21	0,21	0,21
	АцТТ: дефект корпуса (воздушная пора).		
	0,46	0,84	0,47

Значения информативности, представленные в таблице 10 были рассчитаны по результатам обработки с помощью ПО «Пласт 1.0» изображений тепловизионного контраста теплонагруженных аммиачных (Ам) и ацетоновых (Ац) профильных ТТ. При этом был выбран критерий равенства в виде коэффициента асимметрии изотермы по признакам: $A_s \leq 0,05$. Необходимо отметить, что при диагностике АмТТ со штифтовым дефектом парового канала информативность признаков L , Π , S оказалась одинаковой и составила в среднем: $I(L) = I(\Pi) = I(S) = 0,21$.

Выводы

1) В рамках генерации и селекции морфологических признаков теплового поля (L , Π , S), была разработана и реализована новая методика расчета информативности тепловой трубы, отличающаяся применением энергетического принципа и обеспечивающая повышенную чувствительность к локальным искажениям теплового поля профильной ТТ;

2) В рамках информационного принципа впервые для профильных ТТ были разработаны и реализованы новые постадийные методики расчета информативности признаков (L , Π , S) по методу накопленных частот и Шеннона, отличающиеся применением как расчетных (теоретических), так и экспериментальных выборок, а также критерия равенства в виде коэффициента асимметрии изотермических линий и обеспечивающие повышенную достоверность.

Список литературы

1. Карачинов В. А. Защита РЭС в экстремальных условиях. Специальные устройства охлаждения: учебное пособие. Великий Новгород: НовГУ, 2007. 134 с.
2. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов: курс лекций. Москва: Изд-во МГУ, 2004. 85 с.
3. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Информативность телевизионных изображений в системах видеонаблюдения объектов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. 2. 41-51.
4. Зюзин А. В., Кныш М. В., Разиньков С. Н., Тимошенко А. В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. 22(3). 600-609. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609
5. Козодеров В. В., Косолапов В. С., Садовничий В. А. и др. Космическое землеведение: информационно-математические основы. Москва: МГУ, 1998. 571 с.
6. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Abramov A. M., Petrov D. A. Diagnostics of thermal pipes with symmetric structure thermal impact method // Machines. Technologies. Materials: International Scientific Journal. 2019. 13(2). 83-85.
7. 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
8. Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of the thermal imaging method for quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 734. 12058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012058

9. Выбор информативных признаков. Оценка информативности / составитель И. С. Голованова. Томск: Изд. ТПУ, 2003. 18 с.

10. Тарасов Е. М., Герус В. Л., Тарасова А. Е. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий // Вестник Мордовского университета. 2018. 28(2). 191-206. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.191-206

References

1. Karachinov V. A. Zashchita RES v ekstremal'nykh usloviyakh. Spetsial'nye ustroystva okhlazhdeniia [Protection of radio-electronic equipment in extreme conditions. Special cooling devices]. Veliky Novgorod, NovSU, 2007. 134 p.

2. Mestetskii L. M. Matematicheskie metody raspoznavaniia obrazov. Kurs lektsii [Mathematical methods of pattern recognition. Series of lectures]. Moscow, Izd-vo MGU, 2004. 85 p.

3. Sagdullaev T. Iu. Informativnost' televizionnykh izobrazhenii v sistemakh videonabliudeniia ob"ektov [Information content of the television images in video observation systems] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniia. 2009. 2. 41-51.

4. Zyuzin A.V., Knysh M.V., Razinkov S.N., Tymoshenko A.V. Obosnovanie putei postroeniia i otsenka effektivnosti primeneniia prostranstvenno raspredelennoi sistemy informatsionnykh sensorov dlia monitoringa obstanovki [Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring] // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2022. 22(3). 600–609. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

5. Kozoderov V. V., Kosolapov V. S., Sadovnichii V. A. et al; Kosmicheskoe zemlevedenie: informatsionno-matematicheskie osnovy [Space Earth science: information and mathematical foundations] / Ed. A. A. Sadovnichii. Moscow, Izd-vo MGU, 1998. 571 p.

6. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Abramov A. M., Petrov D. A. Diagnostics of thermal pipes with symmetric structure thermal impact method // Machines. Technologies. Materials: International Scientific Journal. 2019. 13(2). 83-85

7. 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

8. Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of the thermal imaging method for quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 734. 12058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/0120589

9. Golovanova I. S., comp. Vybor informativnykh priznakov. Otsenka informativnosti [Selection of informative features. Evaluation of informativeness] Tomsk, Izd. TPU, 2003. 18 p.

10. Tarasov E. M., Gerus V. L., Tarasova A. E. Issledovanie informativnosti priznakov pri raspoznavanii sostoianii rel'sovykh linii [Study of informative value of features in rail condition monitoring] // Mordovia University Bulletin. 2018. 28(2). 191-206. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.191-206

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