
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ

УДК 663.952.1

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ
УГЛЕРОДНЫХ НИТЕЙ РАЗНЫХ ТИПОВ

© 2021 г. Р. С. Ахметханов^{1,*}, А. А. Шульженко¹

¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

**e-mail: mibsts@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

Цель исследований – получение представления об особенностях тепловых полей различных углеродных нитей. Для этого были проведены экспериментальные исследования на различных типах углеродных нитей и при различных уровнях подводимых напряжений к ним. Полученные тепловые поля при этом исследовались методами теории фракталов для оценки степени упорядоченности теплового поля. Получено, что углеродная нить в оболочке имеет лучшие характеристики по упорядоченности теплового поля, но при этом уменьшается значение максимальной температуры теплового поля, среднеквадратическое отклонение плотности распределения температур в поле также меньше по сравнению с подобной нитью без оболочки, т.е. выше однородность теплового поля. Результаты исследований могут использоваться при создании различных изделий на основе углеродных нитей.

Ключевые слова: углеродные нити, филаменты, тепловое поле, упорядоченность, однородность, мультифрактальный спектр, связность Минковского, кластеризация

DOI: 10.31857/S0235711921040027

В машиностроении и других отраслях народного хозяйства используются тканые электронагреватели, являющиеся элементами энергосберегающих нанотехнологий. Характерной чертой тканых нагревательных элементов является простота их конструкции, обеспечивающая высокую технологичность изготовления, способствующая возможности массового изготовления нагревателей с заданными электрическими и тепловыми параметрами. Повторяющаяся технологическая схема, используемая при изготовлении тканых нагревателей, и параллельное расположение тепловыделяющих элементов обеспечивает им небольшое отклонение от заданных физических параметров.

Тепловыделяющие элементы в тканых электронагревателях изготавливаются из различных материалов. Особое место занимают тепловыделяющие элементы из углеродных (графитовых) нитей. Их достоинствами являются высокая эластичность, электропроводность, а также возможность обеспечивать различные уровни и формы теплового воздействия, возможность их использования для эффективного контактного обогрева и т.д.

В тканом электронагревателе углеродная нить в качестве тепловыделяющего элемента используется в сочетании с другими нитями, как неэлектропроводными (основа тканой конструкции), так и низкоомными электропроводными нитями. С помощью низкоомных нитей создаются контактные соединения между углеродными нитями в виде контактных площадок. Они также используются для подведения электричества. Контактные соединения, построенные подобным образом, обеспечи-

вают надежные электрические соединения между углеродными нитями. Они обладают крайне низкими переходными сопротивлениями, намного меньшими сопротивлениями, чем у самих нитей. Контактные соединения практически не влияют на характер тепловых полей, формируемых углеродными нитями.

Обычно к тканым электронагревателям предъявляют ряд требований, в первую очередь, по тепловым параметрам, которым они должны отвечать. Во многом, требуемые свойства тканых электронагревателей, определяются свойствами используемой электропроводной углеродной нити.

Отклонение электрических параметров у углеродной нити в процессе создания ткани достигает до ~20% [1]. Изучение физических свойств углеродной нити позволит добиться снижения отклонений параметров нити в ходе прохождения ею различных технологических операций, благодаря их усовершенствованию. Изменения параметров нити происходят и при эксплуатации углеродных нитей: они могут пушиться и разрываться. Поэтому результаты изучения свойств углеродной нити позволят в дальнейшем усовершенствовать и конструкцию, и технологию изготовления изделий, в которых используется электронагревательная ткань.

Так как электрическое сопротивление тепловыделяющего элемента является одним из основополагающих факторов при расчете мощности нагревателя, обеспечивающего нагрев [2], то рассмотрим, из чего оно складывается в углеродной нити.

Использованные при проведении исследований углеродные нити обладают протяженной структурой, которая организована из элементарных нитей в виде непрерывной формы – филаментов. Филаменты имеют длину меньше длины углеродной нити, распределение филаментов по длине нити имеет случайный характер. Также случайным образом филаменты располагаются и по сечению углеродной нити. Площадь и форма сечений отдельных филаментов так же является случайной величиной. Таким образом, электропроводность нити определяется электрическими свойствами филаментов и случайным распределением контактных взаимодействий между филаментами по объему нити.

Ранее проведенные эксперименты с углеродными нитями показали, что характеристики их тепловых полей зависят от уровня подведенного напряжения, и тепловое поле не имеет идеальной формы. Контур теплового поля и значения температур в нем меняется по длине нити [3].

Поэтому было проведено исследование характера (степени) упорядоченности и однородности теплового поля разных углеродных нитей. В эксперименте использовались три типа углеродных нитей: два образца с одинаковым количеством филаментов в скрутке нити (отличие между этими нитями заключается в том, что одна нить помещена в оболочку), а третий образец отличался отсутствием оболочки и с другим количеством филаментов в скрутке нити. Оболочка образца ПШУС изготовлена из кремнийорганической резины, все остальные технические характеристики схожи с нитью НШ-215. Данные нити сделаны на основе вискозной технической нити по специальной технологии.

В табл. 1 приведены технические характеристики исследуемых нитей.

В табл. 2 приведены данные измерений – подведенного напряжения (В) и тока (А) в нити. Напряжение подавалось источником постоянного тока ОКТОКОМ АТМ-1030. Время выдержки пять минут. Устройство измерения теплового поля – тепловизор фирмы Microp, модель M7604F. По каждой нити (длина нити $l = 400$ мм) проводилось семь измерений при различном уровне напряжения (от 6 до 24 В, с интервалом в 3 В).

Получено, что при одинаковом напряжении, подаваемом на каждый образец нити, уровень тока отличался в зависимости от типа нити. Это явление можно объяснить тем, что при одинаковости количества филаментов в сечении в первом и втором образцах, во втором образце (ПШУС) они прилегают более плотно, так как залиты кремнийорганической резиной, и электрическое сопротивление за счет большего ко-

Таблица 1. Технические характеристики

Вид нити	НШ-215	ПШУС	Н-100
Номинальная линейная плотность	215	215	100
Число филаментов	6000	6000	3000
Удельная разрывная нагрузка	24	24	25
Удлинение при разрыве, %, мин	0.5	0.5	0.3
Номинальное сопротивление, Ом/м	240	240	510
Отклонение от фактического, %	±10	±10	±50
Содержание золы, %, не более	1.0	1.0	1.0
Содержание замасливателя, %	0.8	0.8	0.8
Число кручений, кр./м	120	120	8–100

Таблица 2. Изменение тока в углеродных нитях (А) при изменении напряжения (В)

№№	Тип нити	Напряжение, В	Ток, А
1	НШ-215 (образец 1)	6	0.050
2		9	0.080
3		12	0.110
4		15	0.140
5		18	0.170
6		21	0.210
7		24	0.230
8	ПШУС (образец 2)	6	0.050
9		9	0.085
10		12	0.115
11		15	0.150
12		18	0.175
13		21	0.210
14		24	0.400
15	Н-100 (образец 3)	6	0.020
16		9	0.040
17		12	0.060
18		15	0.080
19		18	0.100
20		21	0.110

личества контактных площадок с большей суммарной площадью контакта получается несколько меньше [3]. В третьем образце количество филаментов в сечении в ~2 раза меньше, чем в образцах 1 и 2, поэтому и сопротивление ~2 раза больше.

На рис. 1 представлены графики зависимости максимальной температуры нити при различной величине подводимого напряжения U .

Все нити (образцы 1, 2 и 3) имеют максимальную температуру при напряжении 24 В (табл. 3). Наибольшую температуру в тепловом поле показал образец 1, содержащий число филаментов в сечении нити 6000. Отличие температур в образцах 1 и 2 вызыва-

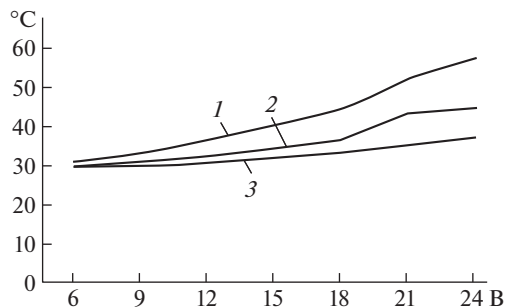


Рис. 1. Зависимости максимальных температур углеродных нитей (1 – НШ-215; 2 – ПШУС; 3 – Н-100) при различных величинах подводимых напряжений.

ется наличием кремнийорганической резины, представляющей собой тепловое сопротивление, снижающее температуру на внешней поверхности оболочки. Наименьшую температуру показал образец 3, имеющий большое номинальное сопротивление нити (табл. 1) и число филаментов в сечении 3000.

Рассмотрим однородность и упорядоченность теплового поля. Однородность, каких-либо физических характеристик, определяется статистически с помощью коэффициента вариации. Вследствие того, что программа MikroSpec4 прилагаемая к тепловизору не имеет функции определения средней температуры в тепловом поле (математическое ожидание температурного множества), анализ отличий тепловых полей различных нитей при одинаковом уровне напряжений производился на основании среднеквадратических отклонений (СКО). Данные по СКО приведены в табл. 4. На рис. 2 показаны графики изменения величины СКО в зависимости от подведенного напряжения к нити.

Можно отметить, что характер изменения среднеквадратических отклонений для всех типов нитей носит идентичный характер. Он обладает сильной нелинейностью изменений. Отличие характеристик второго образца от первого связано с наличием во

Таблица 3. Максимальные температуры углеродных нитей при различных напряжениях

Тип нити	Напряжение, В						
	6	9	12	15	18	21	24
НШ-215	30.9	33.2	36.5	40.7	44.6	52.5	57.7
ПШУС	29.7	30.8	32.5	34.0	36.8	43.4	45.0
Н-100	30.0	30.0	30.7	32.3	33.5	35.1	37.3

Таблица 4. Среднеквадратические отклонения температурных значений в тепловом поле по изображению теплового поля (уровни окрашенности пикселей 0-255) углеродных нитей

Тип нити	Напряжение, В						
	6	9	12	15	18	21	24
НШ-215	1.81	17.50	19.40	31.63	29.85	29.40	28.48
ПШУС	2.28	1.26	11.27	19.03	15.99	26.40	23.70
Н-100	2.06	1.17	1.52	17.46	20.39	24.14	21.76

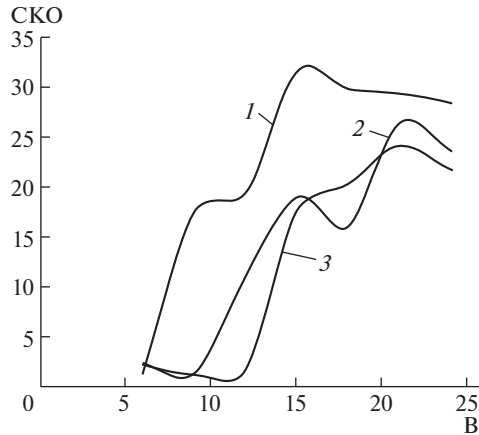


Рис. 2. Среднеквадратическое отклонение (СКО) плотности распределения температур в тепловом поле в единицах окрашенности пикселей: 1 – НШ-215; 2 – ПШУС; 3 – Н-100.

втором образце кремнийорганической резиновой оболочки, что приводит к сохранению более упорядоченной структуры нити, снижению уровня теплового поля и к некоторому снижению среднеквадратических отклонений. Отличие характеристик третьего образца от первого и второго возникает из-за снижения уровня теплового поля за счет более высокого электрического сопротивления, что также приводит к снижению среднеквадратического отклонения. Применение кремнийорганической резиновой оболочки приводит к сближению значений среднеквадратического отклонения образца 2 к образцу 3.

Тепловые поля отражают характеристику структуры, включающую степень взаимной согласованности ее элементов – филаментов и контактных взаимодействий между ними. Рассмотрим тепловые поля исследуемых углеродных нитей с этой точки зрения.

Характер упорядоченности множества элементов углеродных нитей, отраженный тепловым полем, можно оценить с помощью методов теории фракталов. При этом фрактальные свойства объектов (процессов и изображений) различаются на монофрактальные и мультифрактальные.

Для количественного описания фракталов могут использоваться размерности Хаусдорфа или показатели скейлинга, характеризующие сохранность свойств геометрии, структуры или статистических характеристик изменения масштаба.

Однако в физике, химии, биологии и других науках встречаются явления и процессы, которые сложно оценить одним показателем скейлинга. Для описания таких структур, процессов и явлений нужен целый спектр показателей, а размерность Хаусдорфа является лишь одним из многих. Для описания таких процессов, структур и явлений был разработан мультифрактальный подход, который позволил описать их в терминах теории фракталов.

Фактически мультифрактальный подход означает, что изучаемый объект каким-либо образом можно представить в виде нескольких множеств, для каждого из которых наблюдаются свои собственные свойства самоподобия [4–6].

Таким образом, для выявления структурных свойств процессов, явлений и характеристик множеств в теории фракталов было предложено использовать множество размерностей D_q ($q = 0, 1, 2, \dots, n$), определяющих их статистическую структуру [5, 6]

$$D_q = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q}{\ln \varepsilon}, \quad q = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где ε — мерная величина покрытия объекта; p_i — мера i -го покрытия.

Опыт применения мультифрактального подхода при исследовании структуры изучаемого объекта (временных рядов, изображений и множеств) показал наибольшую информативность следующих показателей, которые были определены в рамках теории фракталов: D_0 — размерность Хаусдорфа–Безиковича, данная величина является фрактальной размерностью однородного множества; D_1 — информационная размерность, данная размерность связана со скоростью роста количества информации; D_2 — корреляционная размерность, характеризующая, например, в анализе динамических процессов размерность фазового пространства.

Для оценки мультифрактальных свойств данных в виде временных рядов, изображений или множеств изменения значений q выбирается от $-\infty$ до $+\infty$.

D_{+q} и D_{-q} — экстремальные значения, отвечающие степени разреженности анализируемых данных. Положительный индекс q в выражении (1) — величина, определяющая повышенный вклад ячеек с относительно большими значениями меры p , а отрицательные значения индекса q определяют повышенный вклад ячеек с относительно низкими значениями меры p .

Полученный спектр размерностей D_q позволяет получить количественную характеристику структуры анализируемых данных — мультифрактальный параметр скрытой периодичности структуры (упорядоченности) — $\Delta D = D_1 - D_q$. Чем больше его значение, тем более упорядочена анализируемая структура [7].

Вся совокупность размерностей D_q характеризуется шириной спектра и асимметрией. Выражения, используемые при вычислении мультифрактального спектра, приведены в работе [4].

Мультифрактальный спектр представляется функцией вида $f(\alpha)$, которая характеризует зависимость числа элементов покрытия N_α анализируемого множества от величины покрытия ε при некотором значении параметра α , который связан функционально с индексом q

$$N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}.$$

Величина функции $f(\alpha)$ при условии $\alpha = \text{const}$ соответствует размерности Хаусдорфа.

При равномерном распределении меры p на множестве мультифрактальный спектр представляется единственной точкой на плоскости (α, f) , а при неравномерном распределении меры p функция $f(\alpha)$ имеет выраженный колоколообразный вид.

Физический смысл отдельных значений функции $f(\alpha)$ заключается в том, что оно представляет размерность Хаусдорфа некоего однородного подмножества N_i из исходного множества N , характеризуемого одинаковыми вероятностями заполнения ячеек p . Поэтому набор различных значений функции $f(\alpha)$ представляет собой спектр фрактальных размерностей однородных подмножеств, на которые можно разбить исходное множество N .

Ширина и асимметрия мультифрактального спектра являются характеристиками, которые могут оценивать структуры данных различного масштаба. В случае если мультифрактальный спектр будет иметь длинный левый хвост, исследуемые данные будут иметь структуру нечувствительную к локальным изменениям с малыми величинами

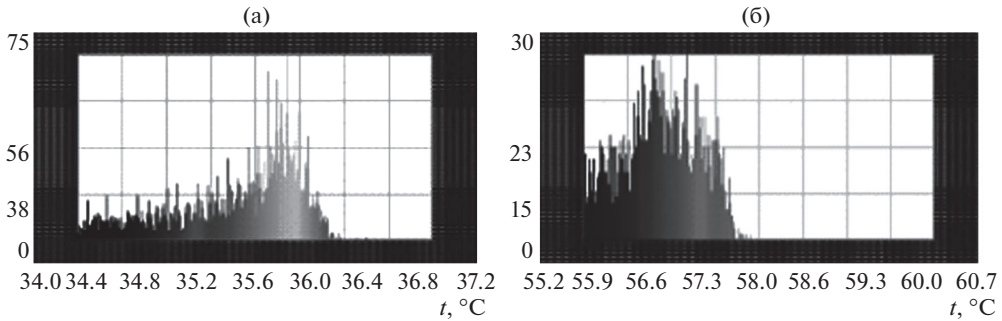


Рис. 3. Гистограммы распределения температур в тепловом поле образца: (а) – 12 В; (б) – 24 В.

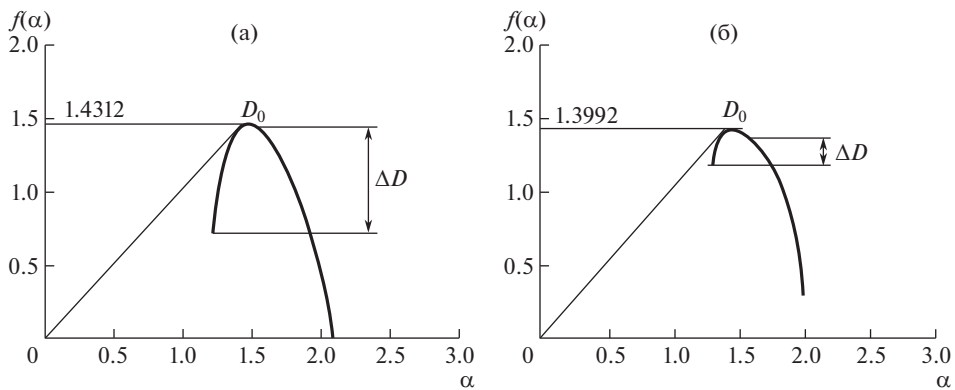


Рис. 4. Мультифрактальные спектры для образца I: (а) – 12 В; (б) – 24 В.

нами. А если мультифрактальный спектр будет иметь длинный правый хвост, тогда данные соответствуют структурам, нечувствительным к локальным изменениям значений с большими величинами.

На рис. 3 приведены гистограммы плотности распределения температур в тепловом поле углеродной нити (образце I) при различных уровнях подводимых напряжений к нити. Гистограмма на рис. 3а представляет распределение с длинными хвостами, которое характерно для мультифрактальных распределений, температура в тепловом поле в диапазоне от 34 до 36,4°С. При напряжении в 24 В диапазон изменений температур от 55,2 до 58,0°С (рис. 3б), а гистограмма представляет распределение близкое к нормальному распределению, что соответствует монофрактальному распределению [8].

На рис. 4 приведены мультифрактальные спектры для различных вариантов подводимого напряжения (программа *ImageJ*, модуль *FracLac*) также для образца I. При напряжении 24 В (рис. 4б) величина ΔD значительно меньше, это говорит о том, что распределение температуры в тепловом поле является более неупорядоченным по сравнению с тепловым полем при 12 В. Уменьшение ширины мультифрактального спектра и величины ΔD показывает на монофрактальный характер распределения значений температур в тепловом поле.

В табл. 5 приведены значения фрактальной размерности D_0 и отмечены значения напряжений, при которых тепловое поле более упорядочено (уп.) или наоборот не-

Таблица 5. Фрактальная размерность D_0

Нить	Напряжение, В						
	6	9	12	15	18	21	24
НШ-215	1.3711	1.3022	1.4312 уп.	1.3722	1.5082	1.4617	1.3992 н/уп.
ПШУС	1.3064	1.3019	1.3329	1.1990	1.2848 уп.	1.4118	1.3608
Н-100	1.3820	1.4804	1.6328	1.7230 уп.	1.5687	1.4736	1.5591 н/уп.

упорядоченно (н/уп.) (образцы 1 и 3). К тому же, по образцу 1 получено, что при напряжении 24 В мультифрактальный спектр вырождается в монофрактальный (оценивается программой *ImageJ*). По образцу 2 упорядоченность теплового поля менялась незначительно по ширине спектра и по величине ΔD в зависимости от напряжения, более упорядоченное поле получено при 18 В. Все спектры мультифрактальные.

На рис. 5 приведены графики изменения связности Минковского (образец 1 при напряжении 12 и 24 В), которая показывает характер изменения температур в тепловом поле. Данные температурные поля были выбраны из-за значительных отличий их упорядоченности

Связность Минковского определяется функцией χ , которая оценивает количественно связанность изображения теплового поля по значениям температуры

$$\chi = \frac{N_w - N_b}{N},$$

где N – общее число пикселей в изображении термограммы; N_w – число непрерывных наборов белых пикселей (сегментов). Пиксели, которые ниже порога, называются “черными”; N_b – число непрерывных наборов (сегментов) “черных” пикселей.

Пороговое значение – текущее значение температуры T в диапазоне температур теплового поля [9]. Точка T^* соответствует условиям равенства по численности наборов черных и белых пикселей.

Представленные функции связности Минковского отличаются по виду и расположению точек T^* . При напряжении 12 В данная точка ближе к области максимальной температуры в тепловом поле. Отличие этих функций (рис. 5) также состоит в том, что для теплового поля при напряжении 12 В максимум связности на уровне 0.02 в диапазоне максимальных температур, тогда как при 24 В она меньше – максимальное зна-

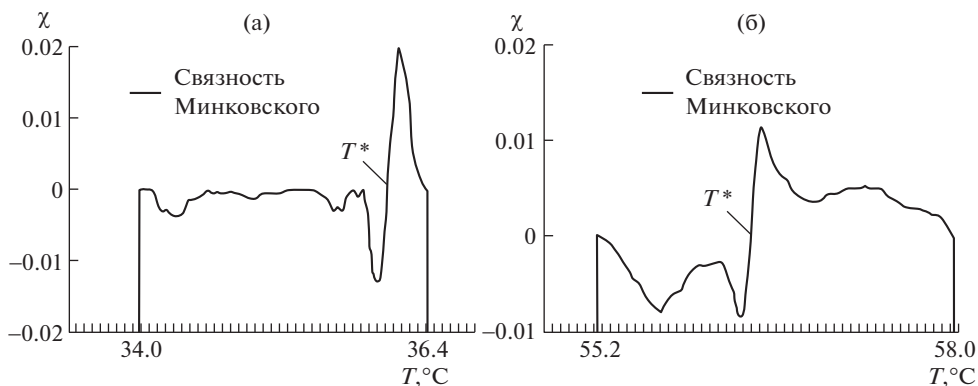


Рис. 5. Связность Минковского χ при напряжениях: – 12 В; (б) – 24 В (образец 1).

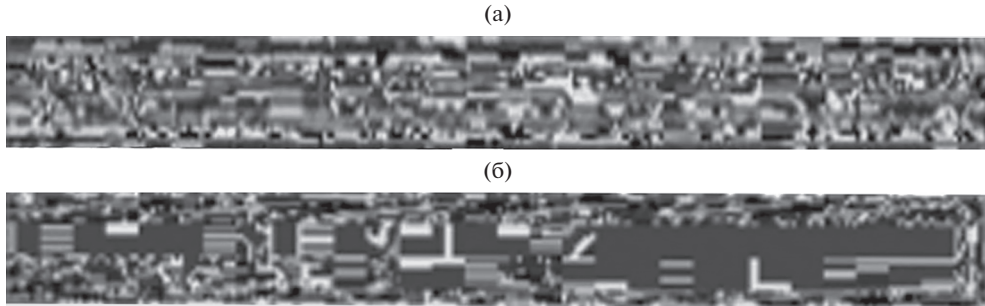


Рис. 6. Кластеризация изображений теплового поля при различных напряжениях: (а) – 12 В; (б) – 24 В.

чение 0.012. Но при этом есть особенность – два пика с близкими максимальными отрицательными значениями в области температур в диапазоне от 55.2 до 56.6°C. Особенности структуры изображения характеризует и асимметрия функции связности Минковского по максимальным значениям.

Максимальные значения связности Минковского по модулю (положительные и отрицательные) показывают уровни температур, где наибольшее различие по количеству непрерывных наборов областей (перколяционных сегментов, кластеров) с меньшими и большими температурами. Поэтому чтобы визуально оценить эти качественные отличия тепловых полей (распределение масштабных элементов) нити НШ-215 (образец 1), которые отличались по упорядоченности, был проведен кластерный анализ их изображений. На рис. 6 приведены результаты кластеризации методом K -средних. Максимальное число кластеров было получено для 12 В – 26 кластеров, а для 24 В – 16 кластеров. Кластеры обозначены уровнем окрашенности пикселей. Структура теплового поля при напряжении 12 В более упорядочена и имеет более равномерное распределение кластеров и их размеров, тогда как при напряжении 24 В сильно отличается по размерам и неравномерности распределения их по тепловому полю.

Заключение. Выявлено, что при изменении подаваемого напряжения на углеродную нить упорядоченность теплового поля меняется (мультифрактальные спектры изображений теплового поля изменяются). Изменения характера теплового поля также показаны с помощью кластерного анализа и вычислением функции связности Минковского. Кластерный анализ показал на разное количество значимых кластеров при различных уровнях подаваемого напряжения на одну и ту же углеродную нить.

Функция Минковского, характеризующая связанность теплового поля на разных пороговых значениях температуры, показывает качественную и количественную распределенность областей с близкой температурой (сегменты).

Наибольшая неупорядоченность теплового поля была в образцах 1 и 3 при напряжении 24 В, тогда как упорядоченность теплового поля в этих образцах определилась для образца 1 – при 12 В, а для образца 3 – при 15 В. Для образца 2 (с оболочкой) при данных напряжениях наибольшая упорядоченность теплового поля при напряжении 18 В. Такие различия в распределении упорядоченности связаны со случайным характером распределения филаментов как по сечению, так и вдоль углеродных нитей и перераспределения контактных взаимодействий при изменении подаваемого напряжения.

За счет фрактальности структуры углеродной нити (вероятностного характера распределения филаментов при их укладке в жгут) электропроводность нити значительно отличается по длине нити. При этом эти свойства меняются с течением времени, они отличаются и при различном уровне подводимого напряжения.

С увеличением напряжения характер изменения силы тока становится нелинейным. Это происходит из-за контактного взаимодействия филаментов, которое влияет на локальную электропроводность углеродной нити. При этом одновременно происходит изменение электрического сопротивления всей углеродной нити, которое также связано с его ковалентной структурой, ростом валентных электронов в зоне проводимости по мере роста температуры с ростом напряжения электрического поля [10]. Эти изменения происходят одновременно и они независимы друг от друга.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметханов Р.С., Шутьженко А.А.* Электропроводность и фрактальные свойства углеродных нитей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 99.
2. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* “Теплопередача”. М.: Энергия, 1975. 487 с.
3. *Deng Y.* Carbon fiber electronic interconnects. Dis. ... Ph. D. University of Maryland, College Park, 2007. 74 p
4. *Павлов А.Н., Анищенко В.С.* Мультифрактальный анализ сложных сигналов // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 8. С. 859.
5. *Baranowski P., Krzyszczyk J., Slawinski C. and other.* Multifractal analysis of meteorological time series to assess climate impacts // Climate research. 2015. V. 65. P. 39.
6. *Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В., Тиен Ч.Р.* Разведочный мультифрактальный анализ многозональных космических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 5. С. 569.
7. *Встовский Г.В.* Элементы информационной физики. М.: МГИУ, 2002. 260 с.
8. *Филимонов А.В.* Мультифрактальные модели временных рядов. Препринт Р1/2010/06. Нижний Новгород: НФ ГУ-ВШЭ, 2010. 45 с.
9. *Klapetek P., Nečas D., Anderson Chr.* Руководство пользователя Gwyddion. Статистический анализ, 2021 (gwyddion.net)
10. *Дмитриев А.С.* Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 790 с.