

УДК 62-408.8:536.758

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ ШЕННОНА
ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2022 С.Р. Абульханов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 16.02.2022

С помощью растрового изображения шероховатой поверхности рассчитываются характеристики особенностей микронеровностей контролируемой поверхности. Предложенные характеристики рассчитываются на основе информационной энтропии Шеннона, корреляционной, условной и выборочной энтропий. Проведен расчет четырех характеристик микрорельефа неизношенной и изношенной поверхностей рассеивателя фары автомобиля «Калина». Показаны границы применимости предложенных параметров для контроля за динамикой изменений шероховатой поверхности. Указаны пути развития предложенных параметров для шероховатых поверхностей, работающих в различных условиях.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, растровое изображение, энтропия Шеннона, корреляционная энтропия, условная и выборочная энтропия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-44-54

ВВЕДЕНИЕ

Время эксплуатации любого изделия машиностроения во многом зависит от характера микронеровностей поверхностей составляющих его деталей. Наиболее доступный метод контроля шероховатости – анализ растрового изображения контролируемого фрагмента поверхности. Такой контроль может проводиться непрерывно, регулярно или случайно [1-2]. Существующие в настоящее время методы контроля шероховатости поверхности (анализа поведения капли жидкости [3-4], трибометрические методы [5-6] и пр. [7]) в значительной степени являются эмпирическими и не используют математически корректные параметры микронеровностей на изображении поверхности. Это обстоятельство не позволяет проводить на основе потока изображений анализ динамики изменения шероховатой поверхности в результате воздействия на неё внешних факторов. Возможность проведения такого анализа открывает новые перспективы контроля динамики изменения эксплуатационных свойств деталей машиностроения. Применительно к оптическим системам это означает возможность контроля отражательной и преломляющей способностей поверхности.

С позиций термодинамики шероховатая поверхность есть граница раздела двух объектов.

Абульханов Станислав Рафаелевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: abulkhanov.sr@ssau.ru

Первый из них может быть – воздушная среда (гомогенная система), а другой – гомогенная смесь, например, оптическое стекло или сплав металла (твердый раствор) [8]. Гомогенная смесь состоит из фаз, в качестве которых могут быть различные по химическому составу или структуре вещества, дефекты кристаллического строения, поры, адсорбированные атомы и т.д. Между фазами с различной интенсивностью непрерывно происходит обмен энергиями и веществом. Это приводит к тому, что граница между гомогенными системой и смесью находится непрерывно в движении. При отсутствии внешнего воздействия на контролируемую поверхность изменения микрорельефа границы будет происходить случайным образом. Причиной тому является хаотический характер расположения фаз и хаотическое взаимодействие их между собой. При случайном или систематическом (например, технологическом) внешнем воздействии на поверхность меняется механизм взаимодействия фаз. По этой причине характер изменения микронеровностей приобретает некоторую закономерность. Количественная оценка взаимодействия фаз не может быть получена без разрушения шероховатой поверхности. Возможность контроля изменения микрорельефа поверхности позволит оценить процессы, происходящие в поверхностном слое детали.

Любая реальная деталь машиностроения испытывает во время эксплуатации внешние воздействия (силовые, температурные, химические и др.). Кроме того, в объеме детали самопроиз-

вольно, без вмешательства извне, происходят процессы релаксации напряжений, изменение границ термодинамических фаз и др. В результате этих обстоятельств любая деталь машиностроения является открытой и необратимой термодинамической системой. Для описания необратимого процесса и системы в целом недостаточно знания форм энергии, входящих в основное уравнение Гиббса [9].

Тем не менее в момент контроля шероховатой поверхности деталь, как термодинамическая система, находится в метастабильном состоянии. При этом контроль шероховатости проводят в лабораторных условиях при неизменной температуре, влажности и давлении. По этим причинам фрагмент исследуемой поверхности будет рассматриваться на момент контроля, как закрытая термодинамическая система. В этом случае контролируемая поверхность будет иметь равномерную плотность поверхностной энергии Гиббса. Очевидно, что изображения одного и того же фрагмента шероховатой поверхности, полученные в разные моменты времени, соответствуют разным термодинамическим состояниям. Это означает, что плотность поверхностной энергии на контролируемом фрагменте, в разные моменты времени разная.

Для параметризации неравновесности шероховатой поверхности, как термодинамического объекта, использовались информационные энтропии, с помощью которых оценивалась мера отклонения системы от равновесного состояния.

Цель статьи – определение энтропийных параметров шероховатой поверхности, которые могут использоваться при исследовании микрорельефа поверхности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Под параметризацией будем понимать извлечение из данных наблюдений минимального набора наиболее существенных параметров, характеризующих изучаемый процесс [10]. Изучаемым процессом являются изменения цифрового изображения шероховатой поверхности.

Будем считать, что исследуемый фрагмент шероховатой поверхности имеет прямоугольную форму, при этом начало декартовых координат находится в левом нижнем углу изображения.

Введём вероятностную «морфологическую систему» для параметризации растрового изображения шероховатой поверхности.

По своей физической природе любая микронеровность является 3D объектом. По этой причине в качестве меры морфологического разнообразия использовалась «вероятность обнаружения» определенных микросостояний

(микронеровностей) на изображении шероховатой поверхности. Признаки наиболее критичных микросостояний могут определяться на основании экспериментальных данных, предварительно полученных на образцах, и на основании информации из литературных источников.

Выявление морфологическими особенностями шероховатой поверхности выполнялись с помощью группировки данных на изображении фрагмента контролируемой исследуемой поверхности.

Первая группа микронеровностей формировалась технологическим воздействием. Для многих технологических операций такой микрорельеф является детерминированным (например, точение, фрезерование, ряд методов упрочнения поверхности и др.).

Вторая группа – это микронеровности, возникновение которых вызвано неоднородностью обрабатываемого материала, а также взаимной диффузией веществ инструмента и обрабатываемого материала, внедрением осколков абразивных зерен в обрабатываемую поверхность, формированием карбидной фазы на поверхности, примесными дефектами кристаллической структуры и др.

Опишем математически изображение шероховатой поверхности. Растровое изображение есть ограниченное дискретное подмножество плоскости R^2 , на котором существует отображение f множества A на множество B или $f: A \rightarrow B$.

Множество A является множеством определения контролируемого отображения: $A = \text{dom}f$. Зададим A следующим образом:

$$A = N_m \times N_n = \{(x, y) : x \in N_m, y \in N_n\}, \quad (1)$$

где $m \in N_{>1}$ и $n \in N_{>1}$ являются размерностью контролируемого изображения. При этом пары (x, y) являются координатами пикселей растрового изображения. Далее будет использоваться следующая запись множества A :

$$A = \{a_{ij} : i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}. \quad (2)$$

Множество B есть множество значений отображения: $B = \text{im}f = f(\text{dom}f)$. Под отображением f будем понимать числовую функцию, значение которой соответствуют яркости пикселя в точке с координатами (x_i, y_i) . Без потери общности далее будем рассматривать черно-белое изображение. В этом случае множество B для глубины цвета 8 бит определим следующим образом:

$$B = \{b_i\} = \{b : (b \in N, b \leq 255) \cup b = 0\}. \quad (3)$$

Шероховатая поверхность формируется воздействием внешних детерминированных и случайных факторов. Поэтому микронеровности могут рассматриваться, как физическая реализация некоторого случайного процесса. По этим причинам будем рассматривать множество B ,

как конечную дискретную выборку случайного процесса.

Определим вероятностное пространство $(\Omega, \sigma, \mathbb{P})$. Пусть $\Omega = B(f) = \{b_i\}$. Величина b_i есть индекс градации серого цвета (далее ГСЦ) пикселя, который рассматривается, как элементарных i -ый исход.

Во многих технических задачах интересует не яркость каждого пикселя, а яркость упорядоченных определенным образом группы пикселей. Применительно к цифровой фотографии шероховатой поверхности группа пикселей, выбранных по определенному признаку, есть проекции фрагмента микронеровности определенной формы на плоскость растрового изображения. В результате технологического воздействия на обработанной поверхности образуются детерминированные и случайные микронеровности. По этой причине микрорельеф на разных образцах, выполненных из одного материала и обработанных на одних технологических режимах, может значительно отличаться.

В работах многих исследователей было установлено влияние параметров шероховатости, измеренных профильным методом, на различные эксплуатационные свойства поверхности деталей машиностроения. Кроме того, на ряд эксплуатационных свойств поверхности (износостойкость, сопротивление усталостному разрушению и др.) влияет объемная форма микронеровностей [11].

О присутствии на растровом изображении микронеровностей заданной формы может указывать группа пикселей, каждый из которых имеет определенную ГСЦ. Таким образом группа пикселей заданной конфигурации и с заданным распределением ГСЦ может рассматриваться как условие (признак) наличия на контролируемых поверхности микронеровностей определенной формы.

В работах [12, 13] на изображении определялось количество групп пикселей в виде полосы с функцией распределения яркости, показанной на рис. 1. Такие микросостояния контролируемой поверхности придавали определенные свойства термодинамическому объекту.

В пространстве элементарных исходов $\Omega = \{b_i\}$ определим различные пространства элементарных событий.

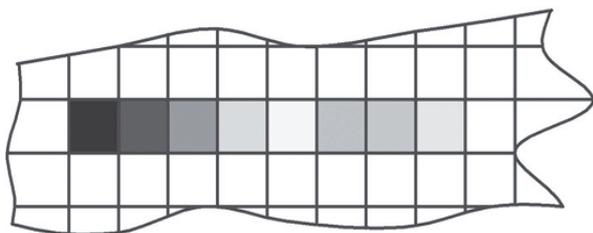


Рис. 1. Заданное распределение градаций серого цвета на полосе пикселей

Пространство σ_1 совпадает с пространством элементарных исходов Ω : $\sigma_1 = \Omega$.

Для множества событий σ_1 пространства элементарных исходов Ω использовалась вероятностная мера \mathbb{P} , которая была определена следующим образом. Для множества событий σ_1 вероятностная мера есть вектор $\mathbb{P}_1^{(1)} = \{p_1, p_2, \dots, p_{256}\}$, где p_k есть частота наблюдения на изображении пикселей с индексом ГСЦ, равным k :

$$p_k = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \{a_{ij} : a_{ij} \in A, f(a_{ij}) = k\}}{m \cdot n}. \quad (4)$$

Определим информационную энтропию Шеннона как функцию, определенную на вероятностной мере термодинамического состояния системы.

$$S_1^{(1)} = - \sum_{i=1}^{|\Omega|} p_i \cdot \ln(p_i). \quad (5)$$

Уменьшение энтропии $S_1^{(1)}$ выражает равномерность распределения яркостных свойств пикселей изображения шероховатой поверхности.

Определим также корреляционную энтропию (энтропия Реньи второго порядка) следующим образом.

$$S_2^{(1)} = - \ln \left(\sum_{i=1}^{256} p_i^2 \right), \quad (6)$$

Корреляционная энтропия рассматривалась, как взаимовлияние элементов структуры изображения на расстоянии равном длине стороны пикселя. Уменьшение корреляционной энтропии $S_2^{(1)}$ говорит о росте хаотичности в рассматриваемой системе.

Элементарные события пространства σ_2 определим как покрытие пространства Ω следующим образом. Технологический и эксплуатационный опыт позволил установить форму и профиль микронеровностей, сформированных технологическим воздействием, которые увеличивали ресурс поверхности детали, работающей в различных условиях. На реальной поверхности детали происходит наложение случайных и детерминированных микронеровностей. В результате у некоторых пикселей из группы может измениться соответствующая яркость. Это означает, что каждый пиксель группы имеет свое случайное распределение ГСЦ. Под пространством элементарных событий σ_2 будем понимать комбинации всех возможных яркостей каждого пикселя каждой группы. Количество всех возможных комбинаций будем рассматривать, как число возможных реализаций одного и того же состояния контролируемой поверхности.

Каждая группа пикселей заданной конфигурации формируются одним инструментом

(резец, фреза) и на одних технологических режимах. Обработка поверхности осуществляется при движении инструмента по периодической траектории. Все эти обстоятельства позволяют предположить что все события пространства σ_2 или, что одно и то же, каждая группа пикселей заданной конфигурации, как микросостояние контролируемой поверхности, будут равновероятны.

Для определения микросостояний поверхности, представляющих интерес использовался вектор информативных признаков $\mathcal{F} = \{\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_p\}$, в котором элементы \mathcal{F}_i есть множество возможных ГСЦ пикселя с определенными координатами в границах каждой группы. Здесь величина индекса p соответствует количеству пикселей в группе заданной конфигурации. При этом $\mathcal{F}_i = \{f_i : i = \overline{1, p}, f_i \in \{0, 1, \dots, 255\}\}$. Вектор признаков \mathcal{F} является показателем, характеризующим некоторую совокупность явлений, которые присутствуют на изображении контролируемой поверхности.

Введем множество координат всех групп пикселей заданной конфигурации \mathcal{A} , яркость которых удовлетворяет вектору признаков \mathcal{F} . $\mathcal{A} = \{\mathcal{A}_i : \mathcal{A}_i \cap \mathcal{A}_j = \emptyset, i \neq j, i = \overline{1, q}, j = \overline{1, q}\} \subset A$, (7) где q – это количество таких групп пикселей на контролируемом изображении. Каждый элемент \mathcal{A}_i множества \mathcal{A} состоит из пикселей. Конфигурация группы пикселей определяется рамкой* группы. Введение локальной системы координат в границах группы пикселей позволит задать распределения яркости пикселей в группах из \mathcal{A} . Количество строк и столбцов в группе \mathcal{A}_i равно: m_{local} и n_{local} . Количество пикселей в каждой группе с заданным распределением яркости равно: $h \leq m_{local} \times n_{local}$.

Случайный характер микронеровностей, обусловленных неоднородностью материала детали приводит к тому, что каждый пиксель группы может иметь не заданную яркость, а ГСЦ из некоторого диапазона значений. Границы диапазона изменения ГСЦ определяют статистически значимыми значениями яркости пикселей.

Выбор распределения ГСЦ каждого пикселя групп \mathcal{A} может быть осуществлен с помощью эвристического метода, не являющегося гарантированно точным или оптимальным, но достаточным для определения статистически значимых границ диапазона изменения значений яркости каждого пикселя группы.

Далее без потери точности будем рассматривать один информативный признак \mathcal{F} .

Определим множество $\mathcal{L} = \{\mathcal{L}_i : i = \overline{1, p}\} \subset B$ Здесь каждое \mathcal{L}_i есть множество значений ГСЦ

* Рамка (граница) состоит из перпендикулярных отрезков, длина которых кратна длине стороны квадратного пикселя

пикселей с определенной координатой в локальной системе координат каждой группы \mathcal{A}_i : $\mathcal{L}_i = \{l_k = b_k : k = \overline{1, h}, \{b_i \in \mathcal{F} : i = \overline{1, q}, b_i = f(a_i), a_i \in \mathcal{A}_i\}\}$. (8)

Каждое условие \mathcal{F}_i формируется в результате использования технологического и эксплуатационного опыта.

Распределение вероятностных событий σ_2 пространства Ω выбиралось исходя из условий эксплуатации поверхности. При коррозии и при массовом износе поверхности первоначально на её фрагментах, затем на всей поверхности исчезает часть поверхностного слоя. Это означает, при прочих равных условиях**, увеличивается расстояние от контролируемой поверхности до ПЗС-матрицы, фиксирующей изображение. В этом случае ГСЦ каждого пикселя на изображении поверхности приобретают более темный тон. Такому поведению случайных величин соответствует гипергеометрическое распределение***. Это распределение будет использовано для выбора значимого подмножества некоторой генеральной совокупности ГСЦ пикселей, принадлежащих подмножеству \mathcal{L}_i .

Отметим, что поверхность, испытывающая знакопеременные нагрузки, подвержена усталостному разрушению. В поверхностном слое разрушаются межмолекулярные связи, появляются микротрещины. По этой причине поверхность поднимается («вспучивается»), что приведет к повышению яркости ГСЦ каждого пикселя на изображении поверхности. В этом случае также применимо гипергеометрическое распределение для значений яркости пикселей, принадлежащих подмножеству \mathcal{L}_i .

Для множества событий σ_2 пространства элементарных исходов Ω использовалась-вероятностная мера \mathbb{P}_2 , которая была определена как матрица.

$$\mathbb{P}_2 = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{h1} & \dots & p_{hp} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где p_{ij} есть частота наблюдения в j группе изображения пикселей с яркостью i , которая принадлежит множеству значений яркости заданного распределения ГСЦ для всех групп множества \mathcal{A} . Величина p_{ij} есть количество пикселей с индексом ГСЦ, равным j , в группе пикселей \mathcal{A}_i :

** Одинаковое положение относительно друг друга ПЗС-матрицы, контролируемой поверхности и источника света, который обеспечивает рассеянное освещение

*** Полагаем, что каждый пиксель есть урна с 28 шарами. Все шары в урне имеют разный цвет. Извлекая шар из урны (ГСЦ), мы не возвращаем его назад при извлечении в дальнейшем нового шара. Цвета всех извлеченных шаров есть случайное событие, подчиненное гипергеометрическому распределению.

$$p_{ij} = \frac{\sum_{\mathcal{A}_i} \{a_{ij} : a_{ij} \in \mathcal{A}_i, f(a_{ij}) = j\}}{|\mathcal{A}_i|}. \quad (10)$$

Информационная энтропия Шеннона для множества событий σ_2 есть вектор:

$$S_1^{(2)} = [S_{1,1}^{(1)}, S_{1,2}^{(1)}, \dots, S_{1,p}^{(1)}], \quad (11)$$

где $S_{1,i}^{(2)}$ – энтропия, вычисленная по формуле (5), для группы пикселей $\mathcal{A}_i \subset \mathcal{A}$.

Для множества событий σ_2 корреляционная энтропия $S_2^{(2)}$ есть вектор

$$S_2^{(2)} = [S_{2,1}^{(2)}, S_{2,2}^{(2)}, \dots, S_{2,p}^{(2)}], \quad (12)$$

где $S_{2,i}^{(2)}$ есть корреляционная энтропия для группы пикселей $\mathcal{A}_i \subset \mathcal{A}$, которая вычисляется в соответствии с выражением (6).

Для определения условной энтропии были введены вероятностное событие σ_{3i} , которое заключалось в определении соседних пикселей с определенной яркостью на множестве \mathcal{A}_i . Далее будем рассматривать два соседних пикселя, имеющих общую грань. При этом индекс яркости у соседних пикселей должна отличаться на k единиц.

$$\mathcal{L}_{ki} = \{l_j = 1 \Leftrightarrow \exists \{b_j, b_{j+1}\} \subset \mathcal{A}_i : |f(b_j) - f(b_{j+1})| \leq k, j = \overline{1, |\mathcal{A}_i| - 1}\}. \quad (11)$$

Физический смысл множества \mathcal{L}_{ki} состоит в следующем – размерность \mathcal{L}_{ki} соответствует количеству пар пикселей, которые имеет общую грань, в границах множества \mathcal{A}_i . При этом разница индексов ГСЦ соседних пикселей отличается на k единиц. Вероятностная мера $\mathbb{P}_i^{(3)}$ есть отношение:

$$\mathbb{P}_i^{(3)} = \frac{2 \cdot |\mathcal{L}_{ki}|}{|\mathcal{A}_i|}. \quad (12)$$

Энтропия, вычисленная в соответствии с выражением (5), является выборочной энтропией $S^{(3)}$ [10, 13]. Энтропии $S^{(3)}$ является количественной мерой разнообразия яркости пикселей на анализируемом фрагменте изображения шероховатой поверхности. При отсутствии разнообразия (на изображении шероховатой поверхности присутствует один цвет) $S^{(3)} = 0$. При максимальной изменчивости яркости, когда на изображении равномерно присутствуют все ГСЦ $S^{(3)}$

Для вычисления выборочной энтропии $S^{(4)}$ определим вероятностное пространство элементарных событий σ_4 следующим образом. Рассмотрим на изображении шероховатой поверхности фрагмент, соответствующий i строке прямоугольной матрицы пикселей. Найдем на этой строке максимум $a_{max,i} = \max_{j=\overline{1,n}} a_{i,j}$

и минимум $a_{min,i} = \min_{j=\overline{1,n}} a_{i,j}$ яркости. Разбиваем интервал $\Delta_i = (a_{max,i} - a_{min,i})$

на равные подинтервалы $\Delta_{ij} = \Delta_i/n_i$ количеством n_i , где $j = \overline{1, n_i}$, i – номер анализируемой строки. При этом величина n_i выбиралась таким образом, чтобы величины подинтервалов Δ_{ij} были не меньше доверительного интервала для всех ГСЦ, которые присутствуют на исследуемом изображении шероховатой поверхности. Вероятностное событие пространства σ_4 есть попадание в подинтервалы Δ_{ij} индекса яркости k пикселя, принадлежащего i -ой строке.

Сумма яркостей по i -ой строке есть норма \mathcal{N}_i есть норма выборки, в качестве которой будем рассматривать i -ую строку изображения:

$$\mathcal{N}_i = \sum_{i=1}^m b_i.$$

Для множества событий σ_4 вероятностная мера есть вектор $\mathbb{P}_i^{(4)} = \{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,256}\}$. введена выражением

$$p_{k,i} = \frac{\sum_{j=1}^n \{b_j = f(a_{ij}) : b_j = k\}}{\mathcal{N}_i}. \quad (13)$$

Здесь $p_{k,i}$ есть частота появления пикселя с индексом ГСЦ, равным k , в строке изображения i . Очевидно, что $\sum_{k=1}^n p_{k,i} = 1$ для каждой i -ой строки изображения.

Выборочная энтропия Шеннона для i -ой строки в этом случае равна

$$S_i^{(4)} = - \sum_{k=1}^n p_{k,i} \log_2 p_{k,i} = - \sum_{k=1}^n \frac{p_{k,i} \log_{10} p_{k,i}}{\log_{10} 2}. \quad (14)$$

Минимальное значение $S_i^{(4)}=0$ соответствует случаю, когда в строке изображения отсутствуют пиксели с яркостью, соответствующей глубине цвета 8 бит. Максимальное $S_i^{(4)}$ достигается при равномерном распределении различных яркостей пикселей i -ой строки, то есть когда все $p_{k,i} = 1/n$ (n – количество столбцов изображения). Тогда $S_i^{(4)} = \log_2 n$.****

Выборочная энтропия $S_i^{(4)}$ дает количественную оценку отклонения яркости пикселей i -строки от однородного распределения. Другими словами $S_i^{(4)}$ характеризует разнообразие распределение яркости пикселей каждой строки изображения шероховатой поверхности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вычисление энтропийных характеристик проводилось на двух изображениях поверхности рассеивателя фары автомобиля «Калина». Первый снимок был выполнен для новой фары (рис.

**** $-\sum_{k=1}^n \frac{p_{k,i} \log_{10} p_{k,i}}{\log_{10} 2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_2 1/n = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log_2 1 - \log_2 n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_2 n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\log_{10} n}{\log_{10} 2} = \frac{n \log_{10} n}{n \log_{10} 2} = \log_2 n$

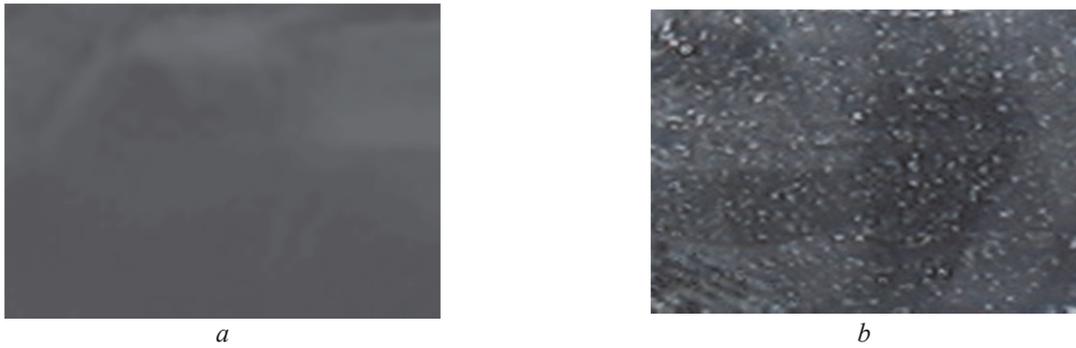


Рис. 2. Изображение поверхности фары автомобиля «Калина»: a – автомобиль без пробега; b – автомобиль с пробегом (25000км)

2), второй снимок был выполнен для фары, установленной на автомобиле, эксплуатируемого в городских условиях и имеющего пробег 25000 километров. На рис. 2 b видна поверхность, изношенная частицами дорожного полотна.

Для получения растровых изображений шероховатых поверхностей использовался фотоаппарат *Nikon D5100*. Фотографирование осуществлялось таким образом, чтобы оптическая ось объектива проходила через ось симметрии образца и была ей перпендикулярна.

Фокусное расстояние и размеры исследуемого фрагмента шероховатой поверхности выбирались таким образом, чтобы сторона пикселя соответствовала $\approx 2,4$ мкм. Исследовался фрагмент поверхности рассеивателя фары размерами $\approx 3 \times 3$ мм, что соответствовало 1250×1535 пикселей. Растровое изображение выполнялось в обоих случаях в одном помещении. При этом образец фары крепился на плите размером $120 \times 90 \times 32$ мм универсально-сборного приспособления (УСП) ГОСТ14368-69. Фотоаппарат крепился над плитой с помощью стойки из комплекта УСП. Перпендикулярность оптической оси объектива, а также расстояние от плиты до отверстия на фотоаппарате для крепления штатива контролировалось с помощью магнитной стойки и индикатором индикатор часового типа ИЧ 0-25 0.01 ГОСТ 577-68, который обеспечивал точность измерения 10 мкм. Для освещения образцов использовалось рассеянное освещение.

1. Информационная энтропия Шеннона $S_1^{(1)}$, рассчитываемая по формуле (5), определялась для изображений a и b на рис. 2. В качестве вероятностной меры использовалась гистограмма изображения, в которой каждое значение элемента гистограммы было отнесено к общему количеству пикселей на изображении ($N=1250 \times 1535=1918750$ пикселей).

2. Корреляционная энтропия $S_2^{(1)}$, рассчитываемая по формуле (6), определялась для изображений a и b на рис. 2. При этом исследовалась статистическая взаимосвязь яркостей двух соседних пикселей, имеющих общую грань.

Корреляционная энтропия определялась также для фрагментов изображения на рис.2 в виде непересекающихся прямоугольников размерами 156×191 пикселя. Каждый такой прямоугольник будет рассматриваться как множество \mathfrak{U}_{ij} , где i и $j=1, 64$.

3. Для вычисления условной энтропии $S^{(3)}$ матрица изображения была поделена на 64 равных и непересекающихся прямоугольника. Для каждого прямоугольника определялась средняя яркость \bar{a}_{ij} , а также её дисперсии D_{ij} . Здесь i и j изменяются от 1 до 8. Величина \bar{a}_{ij} округляется до ближайшего меньшего целого числа $[\bar{a}_{ij}]$. Кроме этого определялась средняя округленная яркость \bar{a}_A и её дисперсия D_A для всего изображения a и b на рис. 2.

Для определения микросостояний поверхности в каждом прямоугольнике разбиения изображений на рис. 2. использовался информативный признак \mathcal{F} , выявляющий те прямоугольники разбиения, которые являются событием в пространстве элементарных исходов Ω . Прямоугольник \mathfrak{U}_{ij} является событием, если выполняется следующее условие \mathcal{F} :

$$[\bar{a}_{ij} - \sqrt{D_{ij}}, \bar{a}_{ij} + \sqrt{D_{ij}}] \subset [\bar{a}_A - \sqrt{D_A}, \bar{a}_A + \sqrt{D_A}]$$

Положим, что на контролируемом изображении было найдено t событий. Очевидно, что в рассматриваемом случае $t \leq 64$. Будем полагать, что все события равновероятны, тогда вероятностная мера $\mathbb{P}_i^{(3)}$ есть отношение:

$$\mathbb{P}_i^{(3)} = \frac{1}{t}, \quad i = \overline{1, t}.$$

В этом случае в соответствии с выражением (5) условная энтропия равна

$$S^{(3)} = \log_2 t. \quad (15)$$

Для вычисления выборочная энтропии $S^{(4)}$ использовалось определение вероятностного события из п. 4 раздела 1. Постановка задачи. Для определения доверительного интервала изменения ГСЦ пикселей строки или всего изображения предполагалось, что яркость пикселей имеет распределение Гаусса.

Таблица 1. Значения энтропий, определённых на растровых изображениях и максимальные теоретически

Энтропия	Поверхность фары автомобиля без пробега	Поверхность фары автомобиля с пробегом
$S_1^{(1)}$	7,31	8,613
$\left(\min_{i=1,64} S_{2i}^{(1)}; \max_{i=1,64} S_{2i}^{(1)} \right) / S_2^{(1)}$	(5,638; 7,108)/6,735	(4,938; 5,793)/5,373
$\left[\min_{i=1,n} S_i^{(3)}; \max_{i=1,n} S_i^{(3)} \right] / S^{(3)}$	[2,873; 4,482] / ($\log_2 56 = 5.807$)	[2,077; 3,873] / ($\log_2 43 = 5.426$)
$\left[\min_{ij} S_{ij}^{(4)}; \max_{ij} S_{ij}^{(4)} \right] / S^{(4)}$	[1,833; 2,471] / ($\log_2 1250 = 10,288$)	[2,366; 5,579] / ($\log_2 1250 = 10,288$)

Размерность изображений и ГСЦ пикселей определялись в программной среде *Matlab*.

В таблице 1 приведены значения различных энтропийных характеристик для растровых изображений шероховатых поверхностей на рис. 2 *a, b*.

Энтропия Шеннона $S_1^{(1)}$, как это видно из таблицы 1, имеет большой интервал возможных изменений: от 7,31 θ до 8,613. При этом увеличение энтропии $S_1^{(1)}$ поверхности рассеивателя фары до его износа (рис. 2 *a*) в сравнении с $S_1^{(1)}$ после износа (рис. 2 *b*) изменяется на 17,8 %. Это означает, увеличилась хаотичность изношенной поверхности рассеивателя фары. Энтропия Шеннона даёт количественную меру степени хаотичности распределения («веса») микронеровностей поверхности [16, 17].

Недостатком энтропии Шеннона $S_1^{(1)}$ является невозможность оценки информации о некоторых (задаваемых) событиях пространства Ω . Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку в практических целях интересует средний угол наклона микронеровностей или среднее количество вершин на некотором диапазоне высоты микронеровностей и др. Кроме того энтропия $S_1^{(1)}$ не фиксирует пропорциональное перераспределение ГСЦ между отдельными пикселями. Это означает, что обмен частотами появления на изображении, например, двух групп пикселей с разными ГСЦ, не будет зафиксировано энтропией $S_1^{(1)}$.

Корреляционная энтропия $S_2^{(1)}$ на поверхности рассеивателя автомобиля с пробегом меньше, чем у поверхности новой фары. $S_2^{(1)}$ (формула (6)) есть статистическая связь яркости двух пикселей, находящихся между собой на расстоянии, равном длине стороны пикселя. Уменьшение энтропии $S_2^{(1)}$ поверхности рассеивателя фары до его износа (рис. 2 *a*) в сравнении с $S_2^{(1)}$ после износа (рис. 2 *b*) изменяется на 20,2 %. Энтропии $S_{2i}^{(1)}$, рассчитанные для равных и непересекающихся прямоугольников

покрытия рис. 2 *a, b*, сохраняется тренд уменьшения корреляционной энтропии. Минимальное уменьшение $S_{2i}^{(1)}$ составляет 10,4 %, максимальное – 18,5 %. Причина этого процесса есть увеличение хаотичности микронеровностей поверхности фары на автомобиле с пробегом.

Выборочная энтропия $S^{(3)}$ уменьшается на поверхности изношенной поверхности рассеивателя, как для всего изображения на рис. 2, так и для покрытий в форме равных и непересекающихся прямоугольников. Причиной этого явления является нарастание хаотичности на поверхности. Об этом также свидетельствует уменьшение событий, определенных на основе практического опыта, с 56 до 43 (изношенная поверхность). Выборочная энтропии в том виде, как она определена в п. 3, может быть вычислена для равномерного распределения элементарных событий в пространстве Ω . По этой причине отношение $S^{(3)}$, вычисленной для изображения с неизвестным распределением событий, к энтропии $S^{(3)}$ этого же изображения, вычисленной согласно с (15), есть меры соответствия равномерному распределению выбранного множества событий. Для прямоугольников покрытия изображения рис. 2 *a* мера соответствия принадлежит диапазону: от $2,873/\log_2 56 = 0,495$ до $4,482/\log_2 56 = 0,772$. Для прямоугольников покрытия изображения на рис. 2 *b* диапазон следующий: от $2,077/\log_2 43 = 0,382$ до $3,873/\log_2 43 = 0,713$.

На рис. 3 показано разнообразие значений (в масштабе) выборочной энтропии $S_i^{(3)}$ для прямоугольных фрагментов изображений шероховатой.

Анализ этих отношений показывает, что распределение яркости на всей поверхности (рис. 2 *a*) и на её фрагментах в большей степени соответствует равномерному распределению, чем на изношенной поверхности и её фрагментах на рис. 2 *b*. Это обстоятельство объясняется тем, что новая поверхность рассеивателя имеет следы технологического воздействия, которые имеют детерминированный характер. Во время

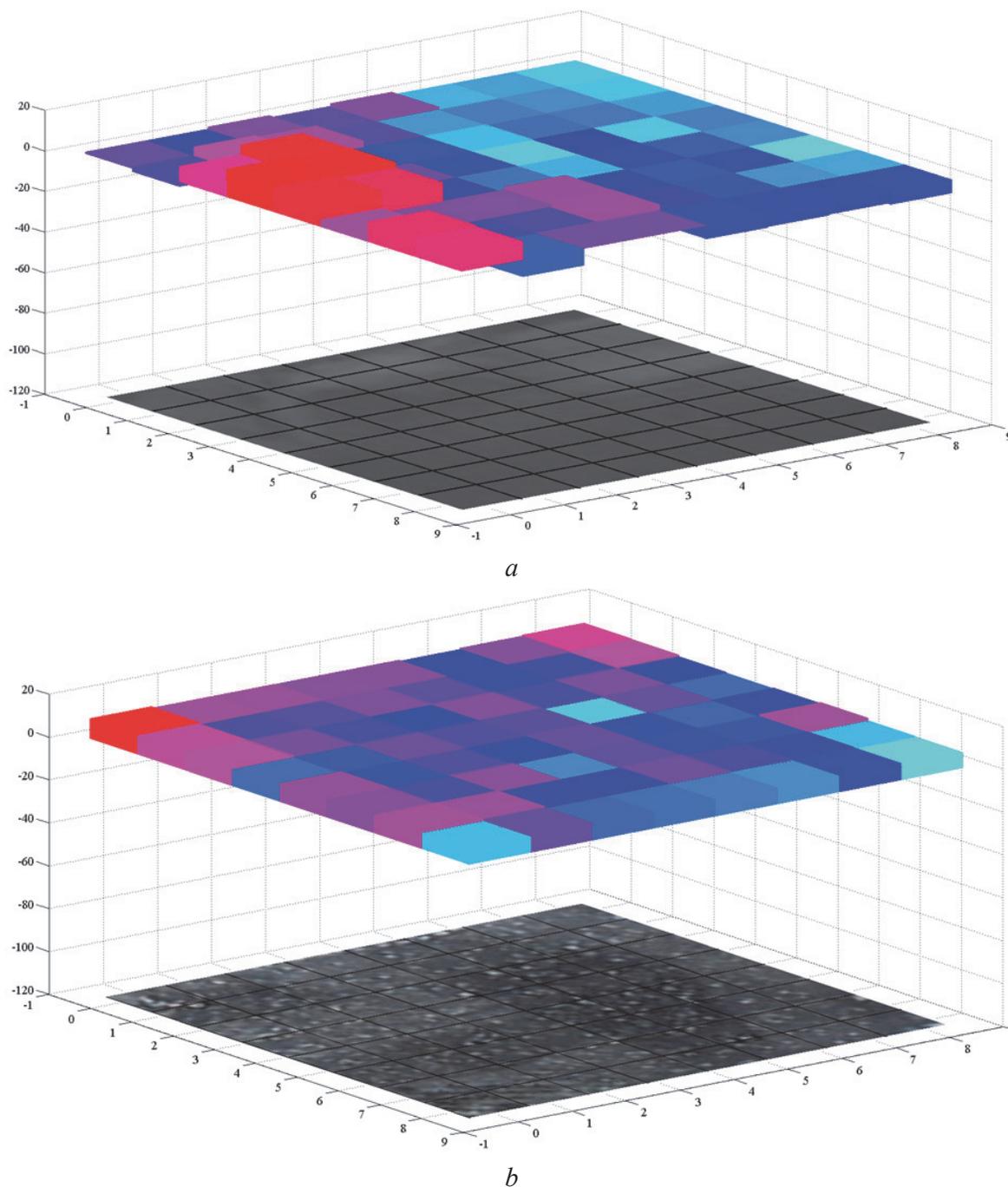


Рис. 3. Разнообразие выборочной энтропии $S_i^{(3)}$ для изображения шероховатой поверхности фары: a – автомобиль без пробега; b – автомобиль с пробегом

эксплуатации автомобиля на поверхность рассеивателя фары воздействуют случайные внешние факторы (химреактивы, абразивные частицы, перепады температуры и др.), поэтому изменения микрорельефа носят случайный характер. При этом нет никаких оснований считать, что распределение яркости на изображении изношенной поверхности будет иметь равномерное распределение. изменения шероховатости.

По указанным причинам использование условной энтропии $S^{(3)}$ для параметризации изменений шероховатой поверхности целесоо-

бразно при выполнении следующих условий:

- множества событий σ_3 пространства элементарных исходов Ω должно быть определено на основании предварительных экспериментальных исследований;
- априорно известно о равномерном распределении микронеровностей на исследуемой поверхности.

Перестановочная энтропия $S^{(4)}$ позволяет оценивать распределение на контролируемой поверхности фрагменты микронеровностей, соответствующих определенному признаку. Из

таблицы 1 видно, что проекции фрагментов микронеровностей, показанная на рис. 1 а, приблизительно в 2-а раза встречается реже, чем на изношенной поверхности рассеивателя фары (рис. 1 б), о чем говорит наименьшая величина энтропии $S^{(4)}$ (автомобиль без пробега). Для изношенной поверхности рассеивателя по величине энтропии S_4 можно судить о том, что на контролируемой поверхности присутствуют микронеровности с проекциями фрагментов своей поверхности, соответствующие проекции на рис. 1 б. А то обстоятельство, что $S^{(4)}$ для изношенной поверхности ближе к своей теоретической наибольшей величине свидетельствует о том, что распределение микронеровностей изношенной поверхности с проекциями, соответствующими рис. 1 б, ближе к равномерному распределению, чем у неизношенной поверхности. Следует отметить, что перестановочная энтропия $S^{(4)}$ способна также учитывать соотношения между группами пикселей, выбранных по определенному признаку. Это обстоятельство позволяет использовать перестановочную энтропию $S^{(4)}$ для оценки гибридных параметров шероховатости (ISO 4287:1997).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные параметры позволили определить статистические связи и закономерности, изменения состояния шероховатости, как термодинамического объекта, а также обнаружить структуры изучаемой совокупности микронеровностей в виде их проекций на плоскость изображения

Использование информационной энтропии Шеннона, рассчитанной для различных событий, определенных на пространстве элементарных исходов, а также для различных вариантов построения вероятностных мер, позволило решить задачу выявления статистических объектов изображения, влияющих на эксплуатационные свойства поверхности.

С помощью эвристических признаков были выделены объекты изображения в виде групп пикселей с заданным распределением яркости и с заданной границей, которые влияют на различные эксплуатационные свойства поверхности.

Несмотря на то, что для параметризации изображения шероховатой поверхности использовались эвристические признаки, расчет с их помощью энтропий Шеннона способствует получению дополнительной информации. Динамика изменения микронеровностей, соответствующих некоторому признаку, позволяет получать более полную информацию о шероховатой поверхности, как термодинамического объекта.

Параметризация поверхности с помощью эвристических признаков оказалась достаточно

чувствительной для использования в технологической практике.

Вместе с этим следует отметить, что энтропия Шеннона является интегральным параметром, поэтому теряется индивидуальная информация о каждой исследуемой группе пикселей. Это не всегда приемлемо при оптимизации режимов технологического воздействия на поверхность детали.

Вместе с этим следует отметить ограниченность применимости вероятностных мер на основе событий, определенных на основании технологического опыта. В этом случае нам не известна мощность выборки, которая может быть статистически незначительной. По этой причине выводы о эксплуатационных свойствах поверхности в результате анализа полученных энтропий могут быть недостоверными.

Энтропия Шеннона не чувствительна к изменениям распределения яркости группы пикселей, а также к распределению их расположения на изображении поверхности. Шероховатая поверхность является открытой термодинамической системой, на которую постоянно воздействуют внешние и внутренние факторы. Вследствие этого изменение распределения яркости пикселей является важным термодинамическим параметром, который не учитывает используемая энтропия Шеннона.

Для исследования открытых неравновесных термодинамических систем используют энтропию Цаллиса [10]. Исследования в этом направлении будут продолжены, полученные результатах будут опубликованы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazanskiy N.L. and Popov S.B. Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2010, Vol. 19, No. 1, pp. 23–30.
2. Abul'khanov S.R., Kazanskiy N.L. Information Pattern in Imaging of a Rough Surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 302, P. 012068. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012068.
3. Бородин, С.А. Устройство для анализа наношероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Оптический журнал. – 2009. – Том 76, № 7. – С. 42–47.
4. Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A. Optical Materials: Microstructuring Surfaces with Off-Electrode Plasma. – CRC Press, London, 2017. Series: Engineering & Technology, Physical Sciences. 212 p.
5. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
6. Ивлиев, Н.А. Определение концентрации органических загрязнений на поверхности диоксида

- кремния методом трибометрии / Н.А. Ивлиев, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский, Н.Л. Казанский // Измерительная техника. – 2017. – № 9. – С. 12-15.
7. *Viktorenkov A.E., Yakimov P.U.* Surface roughness estimation by using a 3D model reconstructed from multiple images // Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1368(5), P. 052037.
 8. *Гулиш, О.К.* Фазовые превращения в твердом растворе ТГС-ТГСе при гидростатическом давлении / О.К. Гулиш, И.Н. Поландов // ФТТ. — 1978. — Т. 20. — С. 3687–3690.
 9. *Хеммингер В.*, Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене. - Пер. с англ. - М.: Химия, 1989. – 176 с.
 10. *Чумак, О.В.* Энтропии и фракталы в анализе данных / О.В. Чумак. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. – 168 с.
 11. *Абульханов, С.Р.* Повышение конструкционной прочности деталей авиадвигателей алмазным выглаживанием отверстий / С.Р. Абульханов, К.Ф. Митряев // Совершенствование технологических процессов изготовления и сборки авиадвигателей: сб. науч. трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С. 128-136.
 12. *Koenedrink, J.J.* Representation of local geometry in the visual system / J.J. Koenedrink, A.J. Doorn // Biological Cybernetics. – 1987. – 55. – P. 367-375.
 13. *Kahraman, C.* Fuzzy Applications in Industrial Engineering. – New York: Springer, 2006, XIV, 598 p.
 14. *Божонкин, С.В.* Фракталы и мультифракталы / С.В. Божонкин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная хаотическая динамика», 2001. – 128с.
 15. *Мартин, Н.* Математическая теория энтропий / Н. Мартин, Дж. Инглэнд. – М.: Мир, 1988. – 387 с.
 16. *Эбелинг, В.* Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур / В. Эбелинг. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 256 с.
 17. *Zhang, Q.* Tsallis information dimension of complex networks / Qi Zhang, Meizhu Li, Yong Deng, Sankaran Mahadevan // Preprint submitted to Physical A, June 9, 2014. – P.1-10.

USING SHANNON INFORMATION ENTROPY FOR PARAMETRIZATION OF THE ROUGH SURFACE OF MECHANICAL ENGINEERING PARTS

© 2022 S.R. Abulkhanov

Samara National Research University, Samara, Russia

Using a raster image of a rough surface, the characteristics of the microroughness features of the controlled surface are calculated. The proposed characteristics are calculated on the basis of the Shannon entropy, correlation (Renyi), conditional and sample entropies. The calculation of four characteristics of the microrelief of unworn and worn surfaces of the headlight lens of the car “Kalina” was carried out. The limits of applicability of the proposed parameters for controlling changes in the rough surface are shown. The ways of developing the proposed parameters for rough surfaces operating under various conditions are indicated.

Keywords: rough surface, raster image, Shannon entropy, correlation entropy, conditional and sample entropy.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-44-54

REFERENCES

1. *Kazanskiy N.L. and Popov S.B.* Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2010, Vol. 19, No. 1, pp. 23–30.
2. *Abul'khanov S.R., Kazanskiy N.L.* Information Pattern in Imaging of a Rough Surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 302, P. 012068. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012068.
3. *Borodin, S.A.* Ustrojstvo dlya analiza nanosherohovatoj i zagryaznenij podlozki po dinamicheskomu sostoyaniyu kapli zhidkosti, nanosimoj na ee poverhnost' / S.A. Borodin, A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy // Opticheskij zhurnal. – 2009. – Tom 76, № 7. – С. 42-47.
4. *Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A.* Optical Materials: Microstructuring Surfaces with Off-Electrode Plasma. – CRC Press, London, 2017. Series: Engineering & Technology, Physical Sciences. 212 p.
5. *Kazanskiy, N.L.* Formirovanie opticheskogo mikrorel'efa vo vneelektrodnoj plazme vysokovol'tnogo gazovogo razryada / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov. – М.: Radio i svyaz', 2009. – 220 s.
6. *Ivliev, N.A.* Opredelenie koncentracii organicheskikh zagryaznenij na poverhnosti dioksida kremniya metodom tribometrii / N.A. Ivliev, V.A. Kolpakov, S.V. Krichevskij, N.L. Kazanskiy // Izmeritel'naya tekhnika. – 2017. – № 9. – С. 12-15.
7. *Viktorenkov A.E., Yakimov P.U.* Surface roughness estimation by using a 3D model reconstructed from multiple images // Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1368(5), P. 052037.
8. *Gulish, O.K.* Fazovye prevrashcheniya v tverdom rastvore TGS-TGSe pri gidrosticheskom davlenii / O.K. Gulish, I.N. Polandov // FTT. — 1978. — Т. 20. — С. 3687–3690.
9. *Hemminger V.* Kalorimetriya. Teoriya i praktika / V. Hemminger, G. Hene. – Per. s angl. – М.: Himiya, 1989. – 176 s.
10. *CHumak, O.V.* Entropii i fraktaly v analize dannyh

- / O.V. CHumak. M. – Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2012. – 168 s.
11. *Abul'hanov, S.R.* Povyshenie konstrukcionnoj prochnosti detalej aviadvigatelej almaznym vyglazhivaniem otverstij / S.R. Abul'hanov, K.F. Mitryaev // Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov izgotovleniya i sborki aviadvigatelej: sb. nauch. trudov. –Kujbyshev: KuAI, 1988. - S. 128-136.
 12. *Koenedrink, J.J.* Representation of local geometry in the visual system / J.J. Koenedrink, A.J. Doorn // Biological Cybernetics. – 1987. - 55. – P. 367-375.
 13. *Kahraman, C.* Fuzzy Applications in Industrial Engineering. – New York: Springer, 2006, XIV, 598 p.
 14. *Bozhonkin, S.V.* Fraktaly i mul'tifraktaly / S.V. Bozhonkin, D.A. Parshin. – Izhevsk: NIC «Regulyarnaya haoticheskaya dinamika», 2001, 128s.
 15. *Martin, N.* Matematicheskaya teoriya entropij / N. Martin, Dzh. Ingland. – M.: Mir, 1988. – 387 s.
 16. *Ebeling, V.* Obrazovanie struktur pri neobratimyh processah: Vvedenie v teoriyu dissipativnyh struktur / V. Ebeling. – Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternyh issledovaniy, NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2004. – 256 s.
 17. *Zhang, Q.* Tsallis information dimension of complex networks / Qi Zhang, Meizhu Li, Yong Deng, Sankaran Mahadevan // Preprint submitted to Physical A, June 9, 2014. – P.1-10.