



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 541.64  
doi: 10.25712/ASTU.2072–8921.2022.01.020

## ОЦЕНКА ВКЛАДА АГЛОМЕРИРОВАННОГО КОМПОНЕНТА В ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПО СРАВНИТЕЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ МИКРОФОТОГРАФИЙ СТРУКТУРЫ

Наталья Николаевна Минакова

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия  
minakova@asu.ru

**Аннотация.** Решение задачи конструирования свойств электропроводящих наполненных полимеров для конкретной области применения осложняется многокомпонентностью структуры таких материалов. Поэтому актуален поиск новых подходов к выявлению закономерностей «структура–свойства».

Предлагается подход к сопоставлению структур электропроводящих наполненных полимеров с помощью показателя, рассчитываемого по двум сравниваемым микрофотографиям.

Объектом исследования выбраны наполненные каучуки с электропроводящим компонентом техническим углеродом, распределение которого по объему структуры сложно для распознавания на микрофотографиях из-за его склонности к агломерированию.

Анализировались одноканальная и трехканальная гистограммы изображений. Трехканальная гистограмма получена в рамках модели RGB. Сравнение гистограмм выполнялось с использованием метода локальных бинарных шаблонов. Использованы расстояния Кульбака–Лейблера и Бхаттачария, характеризующие разницу в структурах материалов, проявляющихся на микрофотографиях.

Показано, что по предложенному в работе подходу сравнение микрофотографий известного материала и материала предлагаемого состава или технологии при минимизации трудозатрат по обработке изображений позволяет оценить наличие или отсутствие разницы в структуре, влияющей на величину электропроводности.

**Ключевые слова:** изображение макроструктуры, полимерные композиционные материалы, наполненные техническим углеродом каучуки, наполненные полимеры, электропроводящий компонент, объемное электрическое сопротивление, метод локальных линейных шаблонов, расстояние Бхаттачария, расстояние Кульбака–Лейблера.

---

**Для цитирования:** Минакова, Н. Н. Оценка вклада агломерированного компонента в формирование электропроводности наполненных полимеров по сравнительным характеристикам микрофотографий структуры // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 147–153. doi: 10.25712/ASTU.2072–8921.2022.01.020.

---

Original article

## EVALUATION OF THE CONTRIBUTION OF THE AGGLOMERED COMPONENT TO THE FORMATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF FILLED POLYMERS ACCORDING TO COMPARATIVE CHARACTERISTICS MICROPHOTOGRAPHY OF THE STRUCTURE

Natalia N. Minakova

Altai State University, Barnaul, Russia  
minakova@asu.ru

**Abstract.** *The solution of the problem of designing the properties of electrically conductive filled polymers for a specific field of application is complicated by the multicomponent structure of such materials. Therefore, the search for new approaches to identifying patterns of "structure-properties" is relevant.*

*An approach is proposed for comparing the structures of electrically conductive filled polymers using an indicator calculated from two compared micrographs.*

*Filled rubbers with an electrically conductive component, carbon black, whose distribution over the volume of the structure is difficult to recognize in microphotographs due to its tendency to agglomeration, were chosen as the object of study.*

*Single-channel and three-channel image histograms were analyzed. The three-channel histogram was obtained within the RGB model. Histograms were compared using the method of local binary templates. Kullback-Leibler and Bhattacharya distances are used, which characterize the difference in the structures of materials that appear in microphotographs.*

*It is shown that, according to the approach proposed in the work, a comparison of microphotographs of a known material and a material of the proposed composition or technology while minimizing labor costs for image processing. Allows you to evaluate the presence or absence of a difference in the structure that affects the magnitude of the electrical conductivity.*

**Keywords:** *macrostructure image, polymer composite materials, carbon black-filled rubbers, filled polymers, electrically conductive component, volumetric electrical resistance, local linear template method, Bhattacharya distance, Kullback-Leibler distance.*

---

**Forcitation:** Minakova, N. N. (2022). Evaluation of the contribution of the agglomered component to the formation of the electrical conductivity of filled polymers according to comparative characteristics microphotography of the structure. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 147-153. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.020.

---

Наполненные электропроводящими компонентами полимеры применяются в различных электротехнических устройствах и электрофизических установках [1–4]. Электропроводность обеспечивается сеткой проводящих частиц, наглядно проявляющейся на изображении структуры материала. Полимер определяет степень уплотнения электропроводящего компонента в материале, процессы физико-химического взаимодействия [5–7].

Электротехнические устройства работают в различных условиях, поэтому материалы должны удовлетворять спектру требований. Структура таких материалов многокомпонентная, поэтому в формировании конечных характеристик участвует множество фак-

торов как рецептурных, так и технологических. Разработка материалов с заданными свойствами для такой гетерогенной структуры из-за невозможности корректного аналитического подхода выполняется обычно с помощью эмпирического подхода.

Конструирование композиционного материала с заданными свойствами требует понимания особенностей формирования структуры в зависимости от состава материала. Существуют различные подходы к оценке свойств многокомпонентных материалов. Один из них – количественная оценка микрофотографий структуры конкретного состава и технологии с помощью текстурного анализа, определения фрактальных параметров и т.д. [8].

## ОЦЕНКА ВКЛАДА АГЛОМЕРИРОВАННОГО КОМПОНЕНТА В ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПО СРАВНИТЕЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ МИКРОФОТОГРАФИЙ СТРУКТУРЫ

Обычно микрофотографии для получения конкретной количественной характеристики подвергаются серии преобработок, например, определение порога бинаризации, конкретизация размера области микрофотографии, в рамках которой рассчитывалось единичное значение признака, выделение границ между проводящим компонентом и полимером и т.д. [8].

Представляло интерес оценить возможность упрощения преобработки для анализа микрофотографий наполненных полимеров.

Было предположено, что уменьшить трудоемкость преобработки из-за вклада возможных разных условий получения микрофотографий в определяемые по ним параметры можно следующим образом: вместо расчета показателей по каждому изображению применить показатель, определяющий отличия одной структуры от другой для двух сравниваемых изображений.

Для проверки этого предположения в качестве объекта исследования выбраны наполненные полимерные материалы, микрофотографии которых согласно литературным данным незначительно отличаются между собой, несмотря на разницу в электропроводности. Такая особенность имеет место, если электропроводящий компонент склонен к агломерированию [2, 7]. Например, при агломерированном техническом углероде добавляется ряд факторов в формирование электропроводности из-за сложной структуры, различного состава частиц на поверхности, связанного с технологией получения, изменения поверхностных свойств, их влияния на физико-химическое взаимодействие в материале. В технологическом процессе одновременно происходят разрушения агрегатов технического углерода, агломерация и деагломерация его частиц, статистическое распределение по фракциям и т.д. Это определяет многофакторный характер взаимодействия с полимером, образуются структуры адсорбированного, окклюдированного и химически связанного полимера [2, 9].

Исследовался наполненный техническим углеродом бутилкаучук БК-2055. Концентрация электропроводящего компонента составляла 80 весовых частей на 100 весовых частей каучука. Применен высокодисперсный технический углерод марок, которые, согласно литературным данным, обладают склонностью к агломерированию П-234 и П-366Э при высокой дисперсности [10]. П-366Э обладает большей склонностью к агломерированию, чем П-234. Разница между величинами объемного электрического со-

противления таких материалов больше, чем на порядок (величина  $\rho_v$  материала на основе П-366Э–0,4 Ом·м, на основе П-234–5,6 ом·м).

Предлагается анализировать микрофотографии наполненных полимеров по сопоставлению гистограмм изображений с использованием линейных локальных шаблонов [11–13].

Вычисление локального бинарного шаблона для некоторого множества точек на исследуемом изображении позволяет получить информацию о изменении яркости на изображении. Метод выбран из-за малой ресурсоемкости и инвариантности при преобразованиях яркости, сохраняющих порядок.

Базовый оператор локального бинарного шаблона использует 8 пикселей окрестности [11–13]. Порог – значение интенсивности центрального пикселя. Результат его применения к пикселю изображения – восьмиразрядный бинарный код, который описывает окрестность этого пикселя. Каждый шаблон несет в себе информацию о соседних точках.

Локальные бинарные шаблоны вычисляются по следующей формуле [11]:

$$LBPp, c = \sum_{p=0}^{p-1} S(g_p - g_c) 2^p,$$

где С – точка, для которой вычисляется локальный бинарный шаблон;  $p = \{0, \dots, P-1\}$  – некая окрестность точки с;  $g_c$  и  $g_p$  – значения яркости в соответствующих точках;  $s$  – функция, которая возвращает 1, если значение в скобках больше нуля.

Программа написана с использованием языка Python и библиотеки Open CV.

Анализировались одноканальные и трехканальные гистограммы. Трехканальная гистограмма построена в рамках цветовой модели RGB – комбинации 3 основных цветов Red (красный), Green (зелёный), Blue (синий) [14].

Преобработка заключалась в унификации размеров выбранных изображений: максимальный размер обрабатываемого изображения совпадает по разрешению с размером экрана компьютера. При считывании изображения с большим разрешением происходит автоматическое преобразование разрешения изображения до нужных размеров. Унифицирование изображений происходит при помощи использования функции библиотеки Open CV [15]. Применен метод билинейной интерполяции.

Рассчитывались гистограммы изображений с помощью функции библиотеки Open CV, которая принимает на вход изображение в качестве массива значений яркости для каждого

пикселя: номер канала (например, для одноканальной гистограммы номер канала = 0); маску для изображения (так как гистограмма строится для всего изображения, значение маски None); количество бинов (256 значений яркости); отрезок значений яркости, которые включаются в гистограмму. На выходе – массив: значения яркости, которые могут принимать пиксели, количество строк (пикселей для изображения размером 256\*256 пикселей) [15].

В рамках модели RGB каждое изображение разбивалось с помощью функции библиотеки Open CV на 3 канала: redchannel, bluechannel, greenchannel. Вычислялась гистограмма для каждого канала в отдельности. Гистограммы каналов сравнивались друг с другом (например, redchannel 1 сравнивался с redchannel 2). В качестве окончательного результата выводилось среднее значение.

Сравнение рассчитанных гистограмм происходило с помощью функции библиотеки Open CV, которая на вход принимает две гистограммы и метод сравнения, возвращает рассчитанную величину [15].

Количественное выражение для расчета «расстояния» между гистограммами можно определить различными методами. На данном этапе выбраны расстояние Бхаттачария и расстояние Кульбака–Лейблера [16, 17].

Расстояние Бхаттачария определялось по формуле [16]:

$$d_b(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{\sum_i \sqrt{H_1(i) \cdot H_2(i)}}{\sqrt{\sum_i H_1(i) \cdot \sum_i H_2(i)}}}$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – сравниваемые гистограммы;  $H_1(i)$  и  $H_2(i)$  – элементы соответствующих гистограмм с номером  $i$ .

Взвешенное расстояние Кульбака–Лейблера в симметричной форме вычислялось по формуле [17]:

$$d(H_1, H_2) = \sum_I H_1(I) \log\left(\frac{H_1(I)}{H_2(I)}\right)$$

где  $H_1, H_2$  – сравниваемые гистограммы изображений.

Для выбранных показателей меньшее расстояние указывает на большее совпадение гистограмм изображений. Поскольку по электропроводности материалы отличаются существенно, корректную оценку структуры дают большие значения вычисленных расстояний.

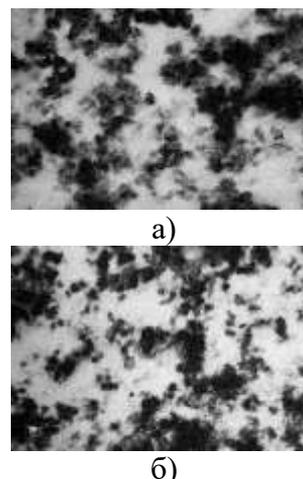


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические снимки (увеличение 32000): основа БК–2055,80 в.ч. на 100 в. ч. электропроводящий компонент: а) П-366Э; б) П-234

Figure 1 - Electron microscopic images (magnification 32000): BK-2055 base, 80 w.h. per 100 in. h. electrically conductive component: a) P-366E; b) P-234

Результаты сравнения микрофотографий материалов с электропроводящими компонентами П-234 и П-366Э (рисунок 1) приведены на рисунках 2, 3.

Полученные результаты показывают, что материалы, отличающиеся по электропроводности, имеют в рамках предложенного подхода количественную разницу в рассчитываемых расстояниях (рисунки 2, 3).

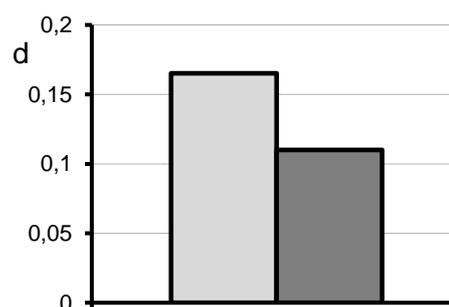


Рисунок 2 – Сравнение гистограмм изображений по расстоянию Бхаттачария. Столбцы слева – одноканальные гистограммы, справа – трехканальные

Figure 2 - Comparison of image histograms by Bhattacharyya distance. The columns on the left are single-channel histograms, on the right are three-channel

**ОЦЕНКА ВКЛАДА АГЛОМЕРИРОВАННОГО КОМПОНЕНТА В ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПО СРАВНИТЕЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ МИКРОФОТОГРАФИЙ СТРУКТУРЫ**

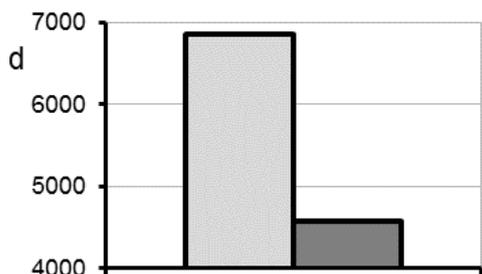


Рисунок 3 – Сравнение гистограмм изображений по расстоянию Кульбака–Лейблера. Столбцы слева – одноканальные гистограммы, справа – трехканальные

Figure 3 - Comparison of image histograms by Kullback-Leibler distance. The columns on the left are single-channel histograms, on the right are three-channel

Разница в электропроводности для таких материалов может быть связана, как известно, с распределением по размерам агломерированного компонента и межфазными взаимодействиями [2, 18].

Для оценки вклада агломерирования без межфазных взаимодействий в рассматриваемый подход использована модель наполненных полимеров, позволяющая учитывать и анализировать геометрию неоднородной макроструктуры в части характеристик, коррелирующих с электропроводностью [19]. Имитационная модель учитывает особенности поведения первичного и вторичного агрегата в технологическом процессе. При формировании структуры частицы вторичного агрегата могут разделяться между собой в отличие от частиц первичного [2, 20].

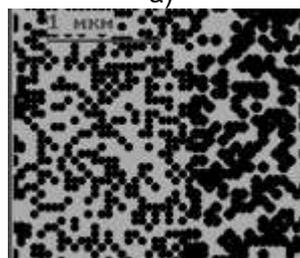
Модельные структуры представлены на рисунке 4.

Они отличаются степенью агломерирования, которая определяется как количество частиц одинакового размера первичного агрегата к количеству частиц первичного и вторичного агрегата [2] (например, в модельной структуре 0–120 количество частиц в первичном агрегате 0, во вторичном – 120).

В таблице 1 представлены результаты сравнения микрофотографий модельных структур. Сравнивались структуры при количестве частиц в первичном и вторичном агрегатах: а – 0–120 и 120–0; б – 120–0 и 60–60; Данные представлены для одноканальной гистограммы (каналы 1) и трехканальной (каналы 3).



а)



б)

Рисунок 4 – Модельные структуры: количество частиц в первичном и вторичном агрегате а) 0–120 и 120–0; б) 120–0 и 60–60

Figure 4 - Model structures: the number of particles in the primary and secondary aggregates а) 0-120 и 120-0; б) 120-0 и 60-60

Таблица 1 – Сравнение гистограмм яркости модельных структур

Table 1 - Comparison of brightness histograms of model structures

Расстояния	Каналы	Сравниваемые объекты	
		а	б
Бхаттачария	1	0,081	0,092
	3	0,0542	0,064
Кульбака–Лейблера	1	5289	3553
	3	3526	2369

Результаты численных экспериментов показали, что оба рассматриваемых расстояния реагируют на сравниваемые структуры.

Сравнение результатов расчетов расстояний между гистограммами изображений для реальных и модельных структур показало, что модельные структуры имеют меньшие числовые показатели по сравнению с реальными. Разница может быть связана с тем, что в реальных структурах имеют место межфазные слои с измененными характеристиками вследствие физико-химических взаимодействий. Они могут частично проявляться на микрофотографии из-за разницы в локальной плотности материала.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенный в работе подход, заключающийся в вычислении параметра, определяющего степень схожести двух микрофотографий структур, позволяет оценить разницу в электропроводности наполненных полимеров с агломерированным компонентом.

2. Рассматриваемые показатели (расстояния Бхаттачария и Кульбака–Лейблера) дают корректные результаты: электропроводящие наполненные полимеры с разницей в электропроводности имеют отличающиеся значения показателей. Закономерности одинаковые – при переходе от одноканальной гистограммы к трехканальной уменьшаются обе величины рассматриваемых показателей. Различие между рассчитанными параметрами меньше, чем между значениями электропроводности. Можно полагать, что это связано с межфазными взаимодействиями.

3. На модельных структурах выявлена та же закономерность: на разницу в структурах реагируют оба рассматриваемых в работе показателя.

4. Сравнение результатов экспериментов на реальных микрофотографиях и модельных структурах показывает, что выявленная схожесть закономерностей отличается по количественному параметру: числовые значения, характеризующие разницу между структурами, меньше у модельных структур по сравнению с реальными. Можно полагать, что это связано с проявлением на микрофотографиях реальных структур межфазных взаимодействий, например, из-за изменения локальной плотности материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.] ; под ред. А.В. Герасимов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 311 с.

2. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М. : Химия, 1984. 240 с.

3. Минакова Н.Н. Моделирование процессов эксплуатационных воздействий для дисперсно-наполненных полимеров // Известия высших учебных заведений физика. 2000. Т. 43. № 1. С. 42–45.

4. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я. Низковольтные характеристики материала на основе каучука с углеродным наполнителем для объемных резисторов // Электричество. 1986. № 4. С. 64–66.

5. Алоев В.З., Козлов Г.В. Физика ориентационных явлений в полимерных материалах. Нальчик : Полиграфсервис. Т. 2002. 288 с.

6. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М. : Химия, 1991. 260 с.

7. Шуплецов В.Г., Орехов С.В., Кулезнев В.Н. Исследование распределения сажи в полимерах методом электронной микроскопии // Высокомолек. соед. Серия А. 1981. Т. XXIII. № 6. С. 1192–1196.

8. Минакова Н.Н., Ушаков В.Я. Текстурированный анализ дисперсной структуры композитных эластомеров с модифицированным углеродным наполнителем // Известия высших учебных заведений. Физика. 2002. Т. 45. № 2. С. 80–83.

9. Крикоров В.С., Колмакова Л.А. Электропроводящие полимерные материалы. М. : Энергоатомиздат, 1984. 176 с.

10. Раздьяконова Г.И. Получение и свойства дисперсного углерода. Омск : ОмГТУ, 2014. С. 154–156.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005. 1072 с.

12. Shan C., Gong S., Mc, Owan P.W. Facial expression based on local binary patterns: A comprehensive study // Image and Vision Computing. 27(6). 2009. P. 803–816.

13. Maenpaa T. The local binary pattern approach to texture analysis – Extensions and Applications. Oulu University Press, 2003. 80 p.

14. Постнов К.В. Компьютерная графика. М. : МГСУ, 2009. 249 с.

15. Open CV: сравнение гистограмм. Сайт. URL: [https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial\\_histogram\\_comparison.html](https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html) [Электронный ресурс]. Дата обращения 17.10.2021).

16. Xu M. Tighter Performance Bounds on Image Registration / M. Xu, P.K. Varshney // in Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2006). 2006. P. 777–780.

17. Боровков Л.Л. Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез. М. : Наука, 1984. 472 с.

18. Минакова Н.Н. Работа резистивных полимерных многокомпонентных материалов в электроустановках. Барнаул, 1997.

19. Минакова Н.Н., Сквирская И.И., Ушаков В.Я., Яровой М.В. Структурно-ориентированная компьютерная модель гетерогенной системы с углеродным наполнителем // Известия вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 6. С. 95–99.

20. Полимерные композиционные материалы : структура, свойства, технология / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин [и др.] ; под ред. А.А. Берлина. СПб. : Профессия. 2008. 560 с.

## Информация об авторе

*Н. Н. Минакова – доктор физико-математических наук, профессор, Алтайский государственный университет.*

ОЦЕНКА ВКЛАДА АГЛОМЕРИРОВАННОГО КОМПОНЕНТА В ФОРМИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПО СРАВНИТЕЛЬНЫМ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМ МИКРОФОТОГРАФИЙ СТРУКТУРЫ

**REFERENCES**

1. Gerasimov, A.V. & Lyukshin, B.A. (2017). Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.).
2. Gul, V.E. & Shenfil, L.Z. (1984). Electrically conductive polymer compositions. Moscow: Chemistry. (In Russ.).
3. Minakova, N.N. (2000). Modeling of processes of operational impacts for dispersed-filled polymers. *Izvestia of higher educational institutions of physics*, 43(1), 42-45. (In Russ.).
4. Minakova, N.N., Skvirskaya, I.I. & Ushakov, V.Ya. (1986). Low-voltage characteristics of a material based on rubber with a carbon filler for bulk resistors. *Electricity*, (4), 64-66. (In Russ.).
5. Alov, V.Z. & Kozlov, G.V. (2002). *Physics of orientational phenomena in polymeric materials*. Nalchik: Polygraphservice. (In Russ.).
6. Lipatov, Yu.S. (1991). Physical and chemical bases of filling polymers. Moscow: Chemistry. (In Russ.).
7. Shupletsov, V.G., Orekhov, S.V. & Kuleznev, V.N. (1981). Investigation of soot distribution in polymers by electron microscopy. *Vysokomolek. Comm., Series A. T. XXIII*, (6), 1192-1196. (In Russ.).
8. Minakova, N.N. & Ushakov, V.Ya. (2002). Textural analysis of the disperse structure of composite elastomers with a modified carbon filler. *News of universities*, 45(2), 80-83. (In Russ.).
9. Krikorov, V.S. & Kolmakova, L.A. (1984). Electrically conductive polymeric materials. Moscow: Energoatom izdat. (In Russ.).
10. Razdyakonova, G.I. (2014). Obtaining and properties of dispersed carbon. Omsk: OmGTU. (In Russ.).
11. Gonzalez, R. & Woods, R. (2005). Digital image processing. Moscow: Technosfera. (In Russ.).
12. Shan, C, Gong, S., Mc & Owan, P.W. (2009). Facial expression based on local binary patterns: A comprehensive study. *Image and Vision Computing*, 27(6), 803-816.
13. Maenpaa, T. (2003). *The local binary pattern approach to texture analysis-Extensions and Applications*. Oulu University Press.
14. Postnov, K.V. (2009). Computer graphics. Moscow: MGSU. (In Russ.).
15. Open CV: comparison of histograms Retrieved from [https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial\\_histogram\\_comparison.html](https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html). (In Russ.).
16. Xu, M. & Varshney, P.K. (2006). Tighter Performance Bounds on Image Registration. *In Proc. IEEE Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP 2006)*. P. 777-780.
17. Borovkov, L.L. (1984). Mathematical statistics. Parameter estimation. Hypothesis testing. Moscow: Nauka. (In Russ.).
18. Minakova, N.N. (1997). Work of resistive polymeric multicomponent materials in electrical installations. Barnaul. (In Russ.).
19. Minakova, N.N., Skvirskaya, I.I., Ushakov, V.Ya. & Yarovoy, M.V. (1998). Structural-oriented computer model of a heterogeneous system with a carbon filler. *Izvestiya vuzov. Physics*, 41(6), 95-99. (In Russ.).
20. Kerber, M.L., Vinogradov, V.M., Golovkin, G.S. and others. (2008). Polymer composite materials: structure, properties, technology. St. Petersburg: Profession. (In Russ.).

**Information about the author**

*N. N. Minakova - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Altai State University.*

*Статья поступила в редакцию 12.01.2022; одобрена после рецензирования 25.01.2022; принята к публикации 28.02.2022.*

*The article was received by the editorial board on 12 Jan 22; approved after reviewing on 25 Jan 22; accepted for publication on 28 Feb 22.*