

Анализ размеров частиц нанопорошков с использованием нейронных сетей и электронной микроскопии

Р. А. Томакова¹ ✉, Д. В. Псарев¹, Ю. А. Неручев², В. А. Старков¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке приложения, предназначенного для автоматического распознавания формы частиц нанопорошка и установления их размеров на основе нейросетевых технологий, обеспечивающего упрощение процесса подготовки документации при его изготовлении.

Методы. Для определения физических свойств нанопорошков при их изготовлении необходимо проведение анализа распределения частиц по размерам. Предложена методология определения распределения частиц нанопорошка по размерам на основе сверточных нейронных сетей. Для обработки используются изображения, полученные с помощью электронной микроскопии, что позволяет значительно ускорить подготовку произведенных порошков к продаже. Собранный для обучения сверточных нейронных сетей датасет содержит как реальные изображения образцов различных видов нано порошков, так и аугментированные данные, а также сгенерированные изображения. При разработке приложения был использован язык Python, графическая среда программирования LabVIEW, сверточная нейронная сеть YOLO и различные библиотеки языка Python.

Результаты. В результате проведенных исследований была получена обученная на собранном датасете нейросетевая модель, которая выполняет распознавание разнообразных частиц на изображениях и устанавливает количественные оценки этих частиц. Для работы с нейросетевой моделью был создан программный интерфейс, который позволяет проводить анализ образцов нанопорошка.

Заключение. Разработанное приложение позволяет в автоматическом режиме определять средний размер частиц порошка на основе полученных изображений нанопорошков с помощью электронной микроскопии, а также строить графики распределения частиц, составляющих нанопорошок, по размерам. Это значительно упрощает работу производителям нанопорошков и облегчает подготовку необходимой документации для произведенного продукта.

Ключевые слова: нанопорошки; распределение частиц по размерам; PSD; электронная микроскопия; обработка изображений; сверточные нейронные сети.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Анализ размеров частиц нанопорошков с использованием нейронных сетей и электронной микроскопии / Р. А. Томакова, Д. В. Псарев, Ю. А. Неручев, В. А. Старков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 84–98. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-84-98>.

Поступила в редакцию 17.10.2023

Подписана в печать 14.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Particle Size Analysis of Nanopowders Using Neural Networks and Electron Microscopy

Rimma A. Tomakova¹ ✉, Danila V. Psarev¹, Yury A. Neruchev², Vadim A. Starkov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop an application capable of automatically determining the particle size distribution of nanopowder using neural network technology in order to simplify the process of preparing documentation during its manufacture.

Methods. To determine the physical properties of nanopowders during their fabrication, it is necessary to analyze the particle size distribution. A methodology for determining the size distribution of nanopowder particles based on light neural networks is proposed. Images obtained by electron microscopy are used for processing, which allows to speed up the preparation of manufactured powders for sale. The dataset collected for training contains real images of samples of different powders, augmented data and generated images. The Python language, LabVIEW graphical programming environment, YOLO convolutional neural network and various Python language libraries were used in the development.

Results. The study resulted in a model trained on the collected dataset that is capable of recognizing particles in images. A software interface was created to work with the model to analyze nanopowder samples.

Conclusion. The developed application allows to automatically determine the size of each powder particle on the basis of the obtained images, as well as to build graphs of their size distribution. This greatly simplifies the work of nanopowder producers and facilitates the preparation of the necessary documentation for the produced product.

Keywords: nanopowders; particle size distribution; PSD; electron microscopy; image processing; convolutional neural networks.

Funding: The research was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Tomakova R. A., Psarev D. V., Neruchev Y. A., Starkov V. A. Particle Size Analysis of Nanopowders Using Neural Networks and Electron Microscopy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 84–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-84-98>.

Received 17.10.2023

Accepted 14.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Распределение частиц по размерам (particle-size distribution, PSD) – это важная характеристика нанопорошка, которая оказывает существенное влияние на его свойства и эффективность его применения [1; 2; 3]. Однако, просто зная средний размер частиц, невозможно с

достаточной точностью описать структуру порошка и его свойства [4; 5]. Это проиллюстрировано на рисунке 1, где показаны различные структуры с одинаковым средним размером частиц, но с разным распределением по размерам. Различия в структуре этих образцов явно видны и могут сильно влиять на их свойства.

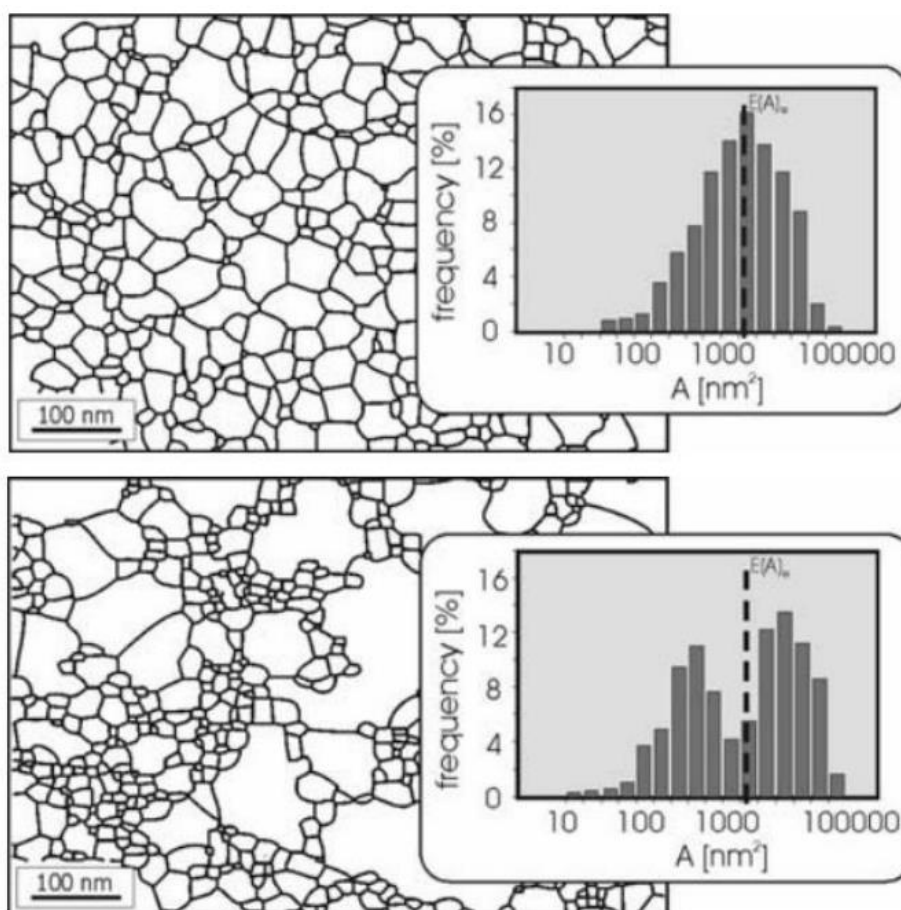


Рис. 1. Структуры образцов, характеризующиеся одинаковой средней величиной размера зерна, но с различным их распределением

Fig. 1. Sample structures characterized by the same average grain size, but with their different distribution

Улучшения в технологиях и методах анализа порошков позволяют более точно контролировать и изучать распределение частиц по размерам. Это дает возможность разработчикам установить связь между структурой порошка и его свойствами, что способствует нахождению оптимальных решений в процессах производства, обработки и характеристики нанопорошков [6; 7; 8; 9].

Более точное изучение и контроль распределения частиц по размерам и химического состава порошка позволяют создавать эффективные материалы с заданными свойствами, применяемые для широкого спектра приложений.

Нанопорошок является смесью зерен различного размера, где мелкая фракция определяет общие свойства порошка. Большой разброс в значениях размеров частиц может нивелировать особенности наносостояния порошка, поэтому на практике обычно требуется получать нанопорошки с узким параметром PSD [6; 7; 10]. Для определения размеров частиц порошка используются различные методы (седиментационные, лазерной дифракции, акустические и др.). Широко применяемым методом получения распределения размеров крупных частиц является фотоанализ – использование фотоснимков измеряемых материалов с последующей программной обработкой.

Для случаев, когда нанопорошок изготавливается для продажи, обязательным этапом производства является получение изображения образца

предлагаемого нанопорошка с помощью электронной микроскопии, которое характеризует визуальные параметры частиц порошка (форму и размеры). Поэтому сопровождаемое изображение можно одновременно использовать и для нахождения PSD произведенного нанопорошка с помощью методов фотоанализа.

Материалы и методы

Цель данной работы – разработка программы, предназначенной для установления распределения по размерам частиц нанопорошка на основе анализа изображений, полученных с помощью электронной микроскопии.

Для достижения поставленных в работе целей были поставлены следующие задачи:

1. Определение размеров каждой из частиц нанопорошка на изображении, полученном с использованием сканирующего электронного микроскопа.
2. Построение графика распределения (графика плотности) найденных частиц по размерам.

Для определения размеров частиц порошка на изображении выбран метод поиска объектов на изображении. Задача заключается в поиске ограничивающих рамок (bounding box) объектов на изображении [11; 12; 13; 14]. Достоинствами данного метода являются автоматическое определение объектов, не полностью находящихся в зоне видимости (например, находятся частично за другими объектами), а также высокая

скорость обработки изображений. К недостаткам метода следует отнести то, что информация о найденном объекте представляет собой ограничивающую рамку, дающую информацию только о размерах полученной частицы. Поэтому ограничением для работы программы будет являться сферичность частиц порошка выше 90%. Найденные на изображении частицы, не удовлетворяющие этому условию, не будут учитываться при подсчете. Также при этом не будут учитываться найденные частицы на краях изображения, так как их размеры могут быть искажены.

Для решения задачи было решено воспользоваться сверточной нейронной сетью (СНС) [15; 16; 17]. В качестве СНС в данной работе используется нейросеть YOLO, которая обеспечивает высокую точность и быстродействие за счет применения сверточной

нейронной сети ко всему изображению за один раз.

Для обучения нейросети был сформирован датасет, состоящий из 400 изображений. 50% датасета составляют реальные изображения нанопорошков, полученные с помощью электронной микроскопии, а оставшиеся 50% были получены с помощью аугментации и генерации данных. Для аугментации выборочных данных был написан программный модуль, позволяющий генерировать изображения, содержащие сферические частицы, расположенные на однородном фоне. На рисунке 2 представлен пример такого сформированного изображения. Далее изображения были размечены (кроме сгенерированных изображений – для них файлы разметки генерируются вместе с изображением). Для разметки датасета использовался инструмент Labellmg (рис. 3).

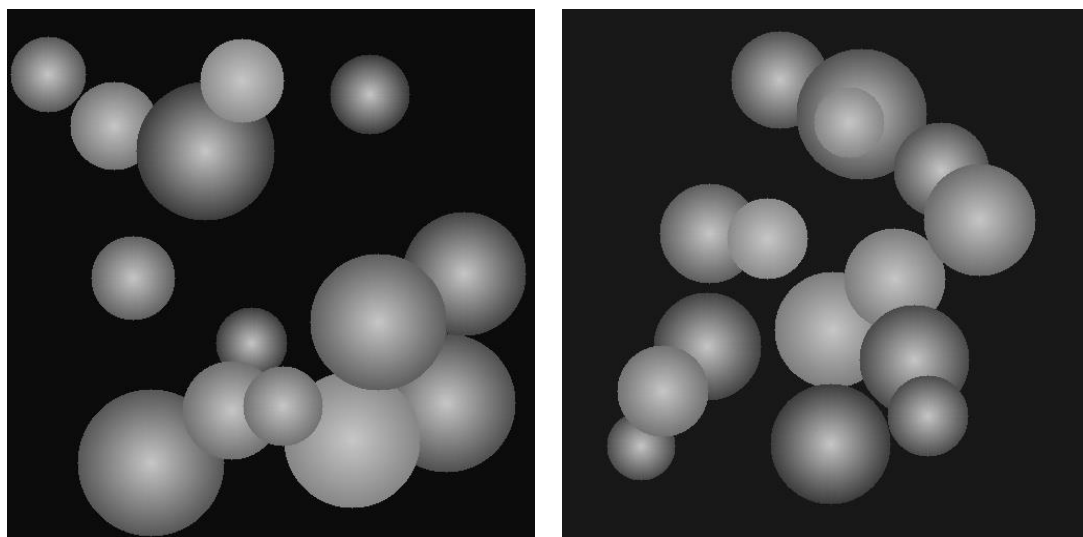


Рис. 2. Изображения, сгенерированные с помощью opencv

Fig. 2. Images generated using opencv

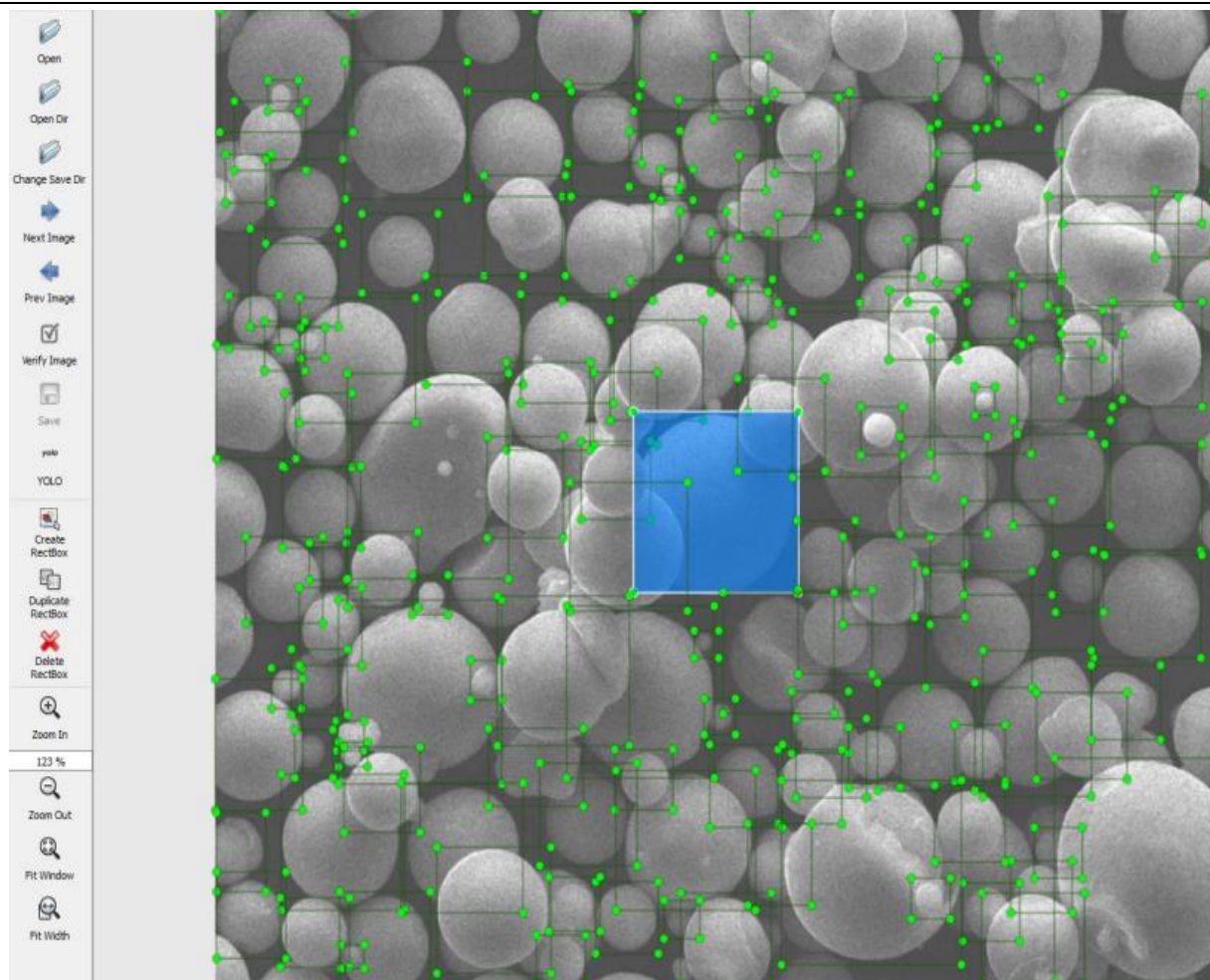


Рис. 3. Проведение разметки частиц нанопорошка [9; 18; 19]

Fig. 3. Marking of nanopowder particles [9; 18; 19]

Сформированный датасет был разделен на обучающую и тестовую выборку в соотношении 4: 1. Модель СНС проходила обучение в течение 8 часов на NVIDIA T4 с использованием системы Google Colaboratory [8; 20]. В дальнейшем была написана программа с использованием данной модели, которая графически выделяет найденные на изображении частицы, а также подсчитывает распределение частиц по размерам.

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы программы рассмотрим изображение с

известным средним размером частиц 30 мкм, например, сферического порошка сплава TiAl4822 (рис. 4).

Результаты работы поиска объектов на изображении с учетом вышеуказанных условий приведены ниже (рис. 5).

На рисунке 5 отмечены все частицы, определенные с помощью СНС: желтым цветом обозначены частицы, удовлетворяющие поставленным ранее условиям, а красным – не удовлетворяющие.

По полученным результатам можно построить распределение размеров частиц порошка на изображении (график плотности распределения).

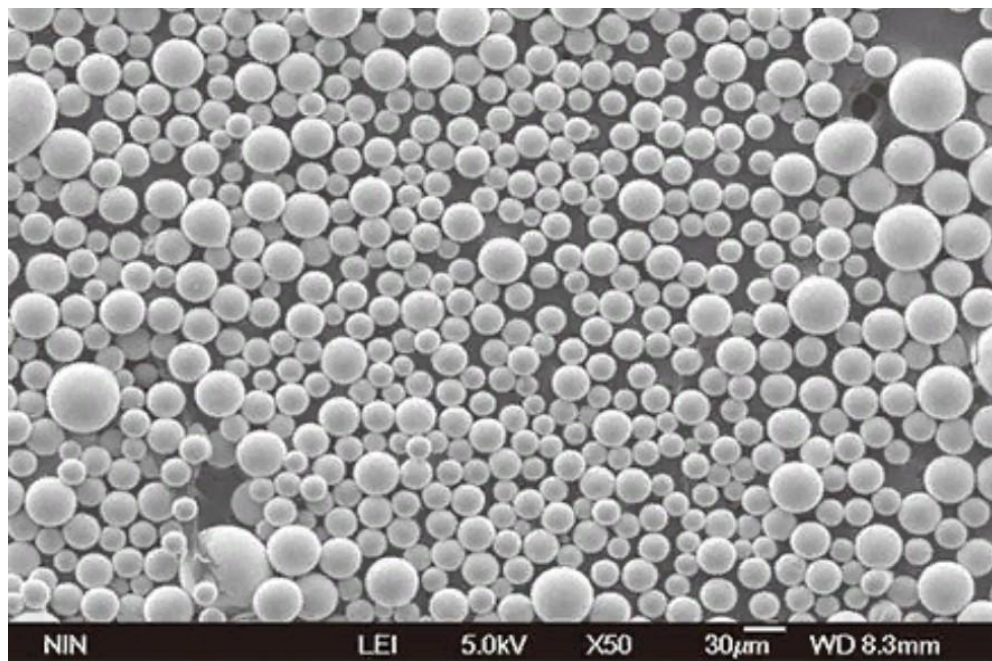


Рис. 4. Изображение сферического порошка сплава TiAl4822 [6; 7]

Fig. 4. Image of spherical alloy powder TiAl4822 [6; 7]

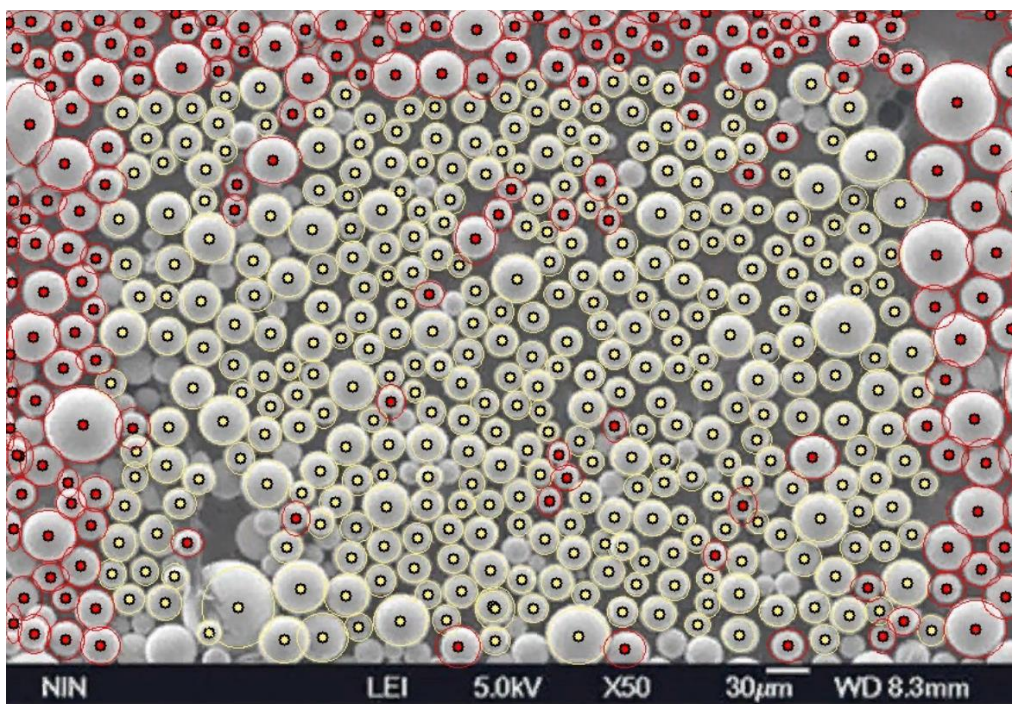


Рис. 5. Обработанное программой изображение порошка

Fig. 5. Powder image processed by the program

Поскольку изображения для разных порошков выполнялись в различном разрешении и с помощью различных

электронных микроскопов, то для определения размеров необходимо дополнительно ввести новый параметр –

количество пикселей в одном микрометре на изображении. С помощью этого параметра можно найти эквивалентные радиусы всех частиц. После получения размеров всех частиц построе-

ние графика распределения частиц по размерам производится с помощью библиотеки *seaborn* в Python [10], которые представлены ниже (рис. 6).

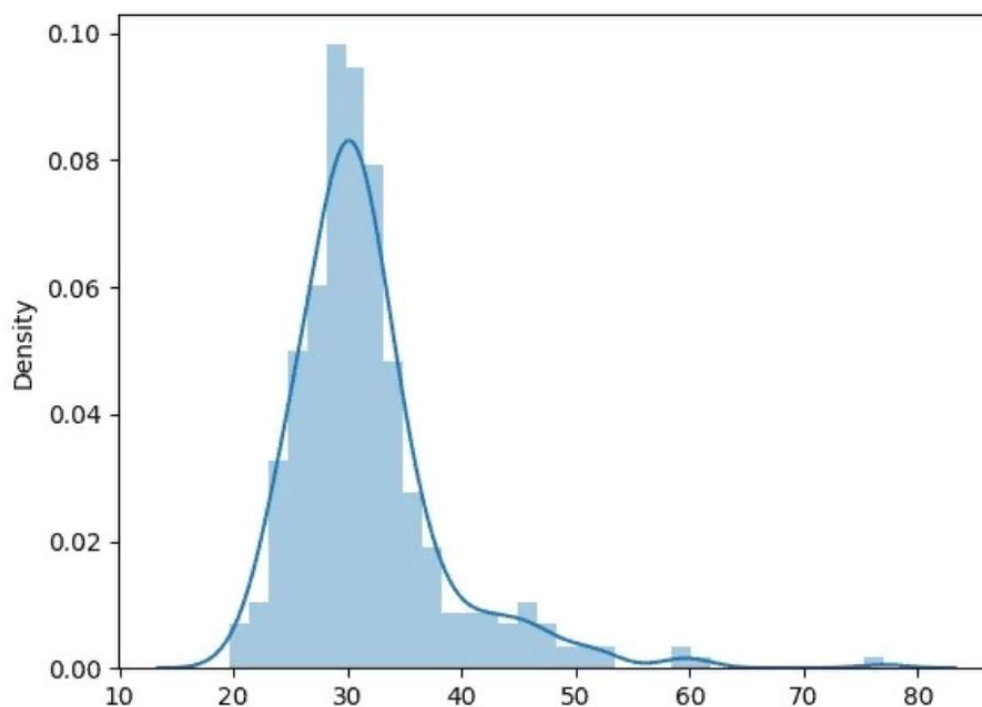


Рис. 6. График распределения частиц по размерам порошка

Fig. 6. Graph of particle size distribution of powder

Анализ полученного распределения свидетельствует о том, что пик графика приходится на 30 мкм, что сопоставляется с данными об образце порошка. Частицы порошка имеют нормальное распределение, не учитывая некоторых крупных частиц. Используя такой график, производитель нанопорошка может определить его основные особенности и определить, какими свойствами он будет обладать.

Итоговое приложение было разработано с использованием системы графического программирования LabVIEW.

Выбор этой системы подтверждается обеспечением и широким использованием LabVIEW в задачах нанотехнологий. Интеграция производится путем использования пакета Python Integration Toolkit.

Схема разработанного приложения отображена на рисунке 7. Кроме указанных ранее параметров были добавлены расстояние от края изображения и коэффициент округлости.

Итоговый скриншот работы приложения приведен ниже (рис. 8).

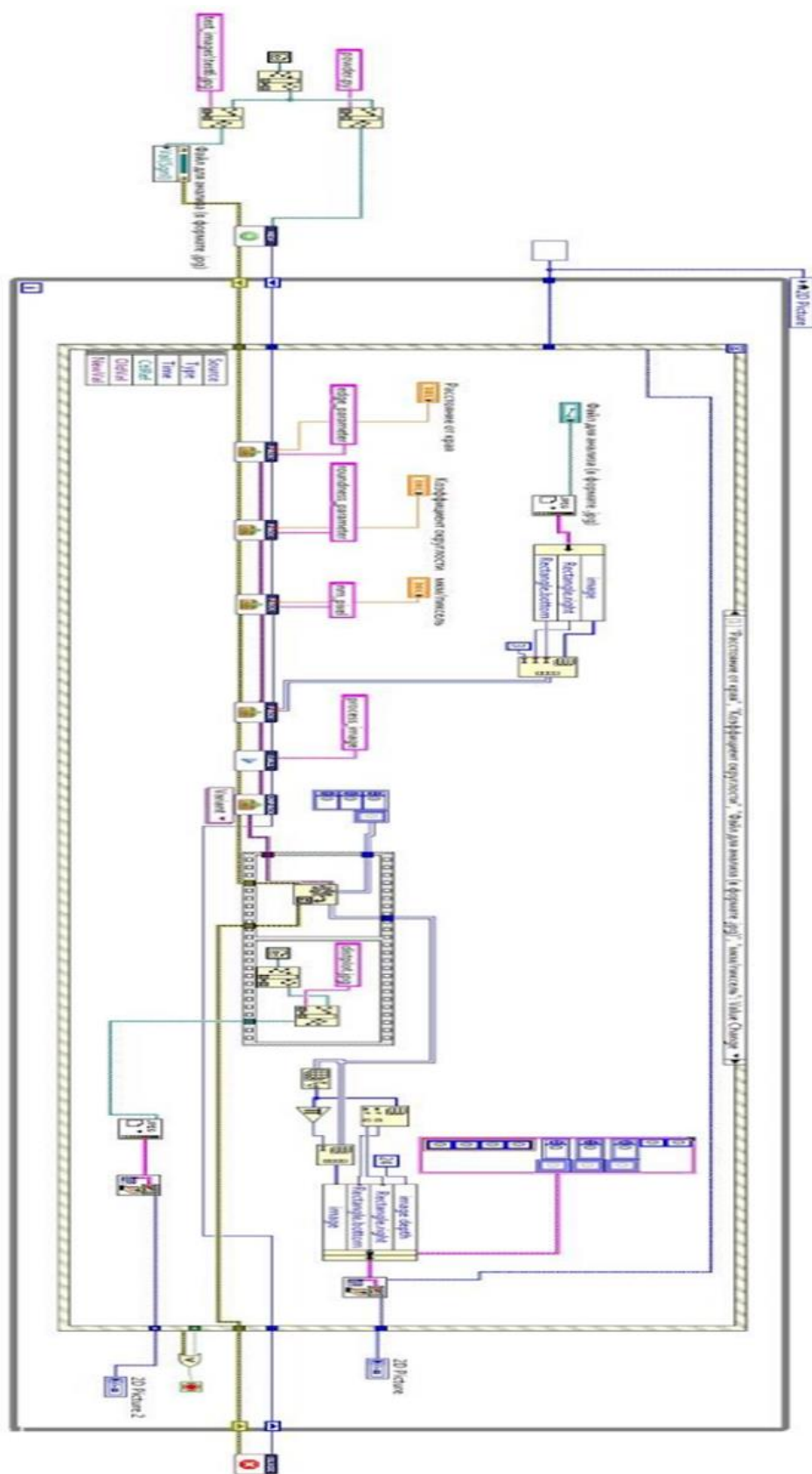


Fig. 7. The final diagram of the application in LabVIEW

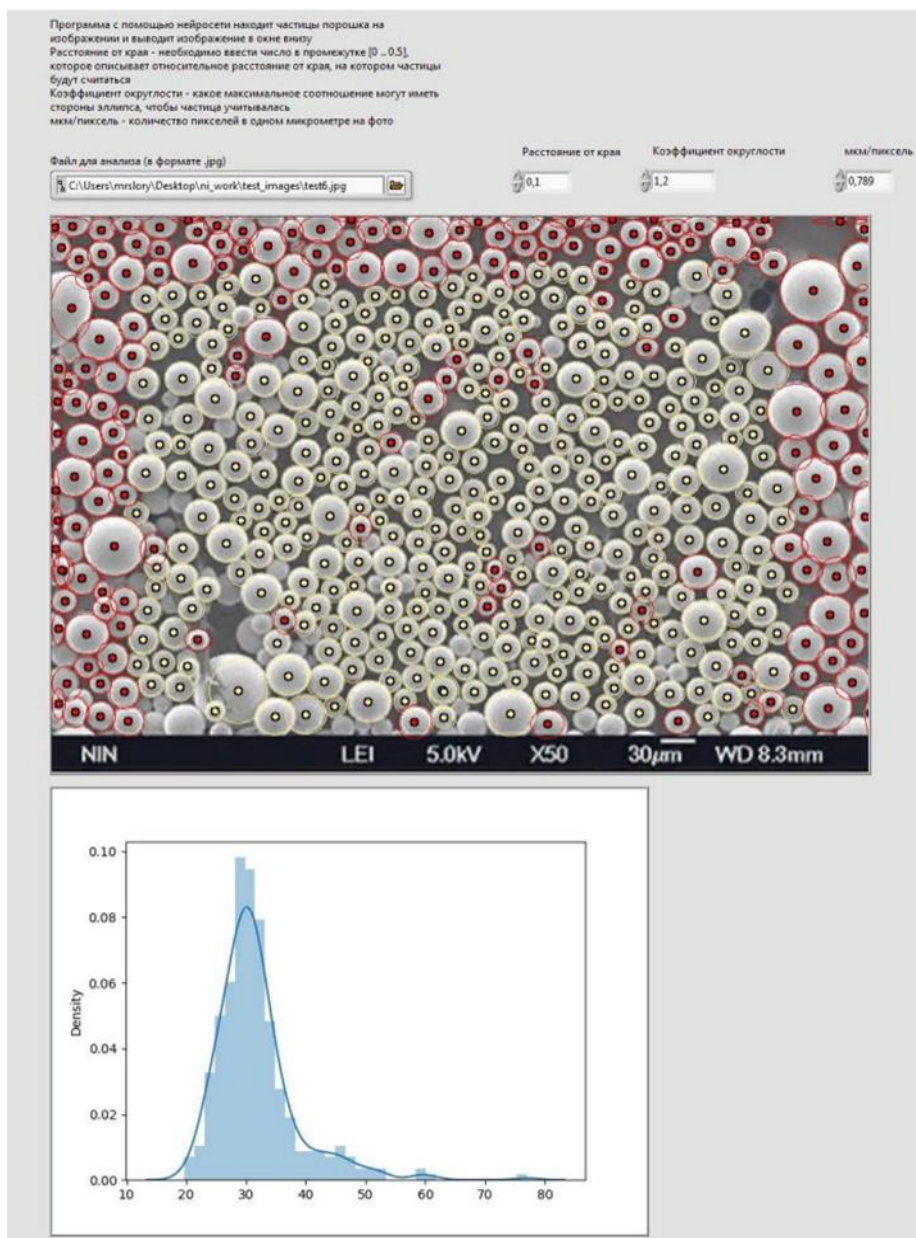


Рис. 8. Скриншоты итоговой работы программы

Fig. 8. Screenshots of the final work of the program

Выводы

На данный момент программа способна работать с нанопорошками, сферичность частиц которых выше 90%. Дальнейшим развитием программы является использование методов определения контуров объектов на изображении с целью получения точных границ каждой частицы.

Данный способ позволит не только определять эквивалентный радиус частиц порошка, но и автоматически определять получаемые формы частиц порошка, что открывает возможность определять бракованные порошки, а также определять свойства материалов, зависящие от характеристик отдельных частиц.

Исследования для обработки изображений, полученных с помощью электронной микроскопии, с использованием нейросетей является малоизученной областью с недостаточным количеством

литературы. Применение новых компьютерных технологий может значительно улучшить процесс анализа частиц нанопорошков и частично автоматизировать его.

Список литературы

1. Application of image analysis for characterization of powders / J. Michalski, T. Wejrzanowski, R. Pielaszek, K. Konopka // Materials Science – Poland. 2005. Vol. 23, N 1. P. 79–86.
2. Обзор композиционных металлополимеров, упрочненных нано- и ультрадисперсными частицами / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, И. В. Ворначева, В. Р. Петренко, И. А. Макарова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 9 (201). С. 424–432.
3. Физико-химическое и математическое описание диффузионных процессов при сварке порошковых материалов / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, В. Р. Петренко, А. В. Филонович // Справочник. Инженерный журнал. 2023. Т. 4, № 313. С. 3–9.
4. Kroetsch D., Wang C. Particle size distribution // Soil sampling and methods of analysis. 2008. Vol. 2. P. 713–725.
5. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В. Н. Гадалов, В. Г. Сальников, Е. В. Агеев, Д. Н. Романенко // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. М.: Инфра, 2011. 468 с.
6. Разработка технологии производства и термическая обработка порошкового титанового сплава Ti6,1Al5,4V1,8Sn / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, Д. С. Алымов, А. В. Филонович, И. В. Ворначева // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19, № 6. С. 276–280.
7. Производитель порошков Slam Metal Powder – Порошок TiAl4822. URL: <https://www.slammetalpowder.com/ru/товар/tial4822-powder/> (дата обращения: 15.09.2023).
8. Google Colaboratory. URL: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения: 01.09.2023).
9. Репозиторий LabelImg. URL: <https://github.com/tzutalin/labelImg> (дата обращения: 02.09.2023).
10. Seaborn: statistical data visualization. URL: <https://seaborn.pydata.org/> (дата обращения: 05.09.2023).

11. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации об их структуре / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 45–51.
12. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–50.
13. Методы и алгоритмы контурного анализа для задач классификации сложно-структурируемых изображений / М. В. Дюдин, А. Д. Поваляев, Е. С. Подвальный, Р. А. Томакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 3-1. С. 54–59.
14. Томакова Р. А., Филист С. А., Томаков М. В. Гибридные технологии в интеллектуальных системах идентификации лекарственных средств // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 6. С. 31–66.
15. Программное обеспечение интеллектуальной системы классификации форменных элементов крови / Р. А. Томакова, С. А. Филист, В. В. Жилин, С. А. Борисовский // Фундаментальные исследования. 2013. Т. 10, № 2. С. 303–307.
16. Саввин С. В., Сирота А. А. Алгоритм построения многокадрового сверхразрешения изображений в условиях аппликативных помех на основе глубоких нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 130–138.
17. Бережнов Н. И., Сирота А. А. Универсальный алгоритм улучшения изображений с использованием глубоких нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 2. С. 81–92.
18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039–6041.
19. Клеточные процессоры в классификаторах многоканальных изображений / С. А. Филист, Р. А. Томакова, А. Н. Брежнева, И. А. Малютина, В. А. Алексеев // Радио-промышленность. 2019. № 1. С. 45–52.
20. Сирота А. А., Дрюченко М. А., Пузатых М. С. Моделирование аппликативных помех на изображениях с использованием глубоких нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 4. С. 87–98.

References

1. Michalski J., Wejrzanowski T., Pielaszek R., Konopka K. Application of image analysis for characterization of powders. *Materials Science – Poland*, 2005, vol. 23, no. 1, pp. 79–86.
2. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Vornacheva I. V., Petrenko V. R., Makarova I. A. Obzor kompozicionnyh metallopolymerov, uprochnennyh nano- i ul'tradispersnymi chasticami [Overview of composite metal polymers reinforced with nano- and ultradisperse particles]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2021, vol. 17, no. 9 (201), pp. 424–432.
3. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Petrenko V. R., Filonovich A. V. Fiziko-himicheskoe i matematicheskoe opisanie diffuzionnyh processov pri svarke poroshkovykh materialov [Physico-chemical and mathematical description of diffusion processes in welding of powder materials]. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal = Handbook. Engineering Magazine*, 2023, vol. 4, no. 313, pp. 3–9.
4. Kroetsch D., Wang C. Particle size distribution. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2008, vol. 2, pp. 713–725.
5. Gadalov V. N., Sal'nikov V. G., Ageev E. V., Romanenko D. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of metals, powder materials and coatings obtained by electric spark methods]. *Upravlenie personalom i intellektual'nymi resursami v Rossii [Personnel management and intellectual resources in Russia]*. Moscow, Infra Publ., 2011. 468 p.
6. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Alymov D. S., Filonovich A. V., Vornacheva I. V. Razrabotka tekhnologii proizvodstva i termicheskaya obrabotka poroshkovogo titanovogo splava Ti6,1AL5,4V1,8SN [Development of production technology and heat treatment of powder titanium alloy Ti6,1AL5,4V1,8SN]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Procurement Production in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 276–280.
7. Proizvoditel' poroshkov Slam Metal Powder – Poroshok TiAl4822 [Manufacturer of Slam Metal Powder – Powder TiAl4822]. Available at: <https://www.slammetalpowder.com/ru/tovar/tial4822-powder/>. (accessed 15.09.2023)
8. Google Colaboratory. Available at: <https://colab.research.google.com/>. (accessed 01.09.2023)
9. Repozitorij LabelImg [The Labeling repository]. Available at: <https://github.com/tzutalin/labelImg>. (accessed 02.09.2023)
10. Seaborn: statistical data visualization. Available at: <https://seaborn.pydata.org/>. (accessed 05.09.2023)
11. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii ob ih strukture [Method of

classification of radiographs based on the use of global information about their structure]. *Biomedicinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 45–51.

12. Tomakova R. A., Filist S. A., Naser A. A. Nechetkie nejrosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na medicinskih izobrazheniyah [Fuzzy neural network technologies for identifying segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomedicinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 43–50.

13. Dyudin M. V., Povalyaev A. D., Podval'nyj E. S., Tomakova R. A. Metody i algoritmy konturnogo analiza dlya zadach klassifikacii slozhnostrukturiruemyyh izobrazhenij [Contour analysis methods and algorithms for classification problems of complex structured images]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 54–59.

14. Tomakova R. A., Filist S. A., Tomakov M. V. Gibridnye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah identifikacii lekarstvennyh sredstv [Hybrid technologies in intelligent drug identification systems]. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = *Neurocomputers: Development, Application*, 2014, no. 6, pp. 31–66.

15. Tomakova R. A., Filist S. A., Zhilin V. V., Borisovskij S. A. Programmnoye obespechenie intellektual'noj sistemy klassifikacii formennyh elementov krovi [Software of the intelligent classification system of shaped blood elements]. *Fundamental'nye issledovaniya* = *Fundamental Research*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 303–307.

16. Savvin S. V., Sirota A. A. Algoritmy postroyeniya mnogokadrovogo sverhrazresheniya izobrazhenij v usloviyah aplikativnyh pomekh na osnove glubokih nejronnyh setej [Algorithm for constructing multi-frame super-resolution of images in the conditions of applicative interference based on deep neural networks]. *Kompyuternaya optika* = *Computer Optics*, 2022, vol. 46, no. 1, pp. 130–138.

17. Berezhnov N. I., Sirota A. A. Universal'nyj algoritmy uluchsheniya izobrazhenij s ispol'zovaniem glubokih nejronnyh setej [Universal image enhancement algorithm using deep neural networks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii* = *Bulletin of the Voronezh State University. Series: System analysis and Information Technology*, 2022, no. 2, pp. 81–92.

18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6039–6041.

19. Filist S. A., Tomakova R. A., Brezhneva A. N., Malyutina I. A., Alekseev V. A. Kletochnye processory v klassifikatorah mnogokanal'nyh izobrazhenij [Cellular processors in multichannel image classifiers]. *Radiopromyshlennost'* = *Radio Industry*, 2019, no. 1, pp. 45–52.

20. Sirota A. A., Dryuchenko M. A., Puzatyh M. S. Modelirovanie aplikativnyh pomekh na izobrazheniyah s ispol'zovaniem glubokih nejronnyh setej [Modeling of applicative interference in images using deep neural networks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology*, 2022, no. 4, pp. 87–98.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Псарев Данила Викторович, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Pppkddd24@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-1737-4703

Danila V. Psarev, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
ORCID: 0009-0003-1737-4703

Неручев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Yury A. Neruchev, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics, Kursk State University, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Старков Вадим Артемович, студент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: safmp333@list.ru,
ORCID: 0009-0009-0038-5119

Vadim A. Starkov, Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: safmp333@list.ru,
ORCID: 0009-0009-0038-5119