

УДК 621.432/004.932

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-32-37>

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *IMAGEJ* ЧАСТЬ 3. МЕТОД ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ, КОЛИЧЕСТВА И ФОРМЫ ЧАСТИЦ

В.К. Корнеева,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.М. Капцевич,

зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

А.И. Цымбалюк,

студент факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ

А.В. Макаревич,

студент факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ

На примере анализа фильтрограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч, полученной методом мембранной фильтрации, показана возможность использования предложенной методики и алгоритма анализа цифрового изображения частиц износа с применением программного комплекса ImageJ. Использование разработанного алгоритма, включающего три стадии: подготовку изображения, его сегментацию и непосредственный анализ, позволило определить размеры частиц, их количество и форму, по которым можно судить о характере износа и интенсивности изнашивания трибосопряжений двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: моторное масло, мембранная фильтрация, фильтрограмма, цифровое изображение, частицы, размеры, количество, форма, ImageJ, алгоритм.

The possibility of using the proposed method and algorithm for analyzing the digital image of wear particles using the ImageJ software package is shown using the example of analyzing the filtergram of Lukoil Avangard 10W40 motor oil with an operating time of 150 hours, obtained by membrane filtration. The use of the developed algorithm, which includes three stages: image preparation, its segmentation and direct analysis, made it possible to determine the sizes of particles, their quantity and shape, which can be used to judge about the nature of wear and the intensity of wear of the tribounits of the internal combustion engine.

Key words: motor oil, membrane filtration, filtergram, digital image, particles, size, quantity, shape, ImageJ, algorithm.

Введение

Моторное масло является носителем информации как о состоянии самого масла, так и о работоспособности ДВС и его систем [1]. Во время работы ДВС в моторном масле происходит процесс непрерывного накопления загрязнений. По своему отрицательному воздействию наиболее опасными загрязнениями, влияющими на состояние самого масла и на работу двигателя, являются абразивные частицы и продукты износа ДВС [2]. Контролируя генерирование продуктов износа в моторном масле и определяя при этом, размеры частиц, можно охарактеризовать процесс изнашивания трибосопряжений ДВС. Кроме того, определяя количество и форму таких частиц, можно

оценить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей и характер износа [3].

Одним из методов контроля присутствия абразивных частиц и продуктов износа ДВС в моторном масле является метод мембранной фильтрации – патч-тестирование [4], позволяющий наглядно контролировать их наличие и при этом оценивать размеры и количество. Этот метод заключается в вакуумной фильтрации масла через мембрану с последующим анализом полученной фильтрограммы с осажденными на ней частицами загрязнений.

Для реализации данного метода в условиях предприятий АПК в работе [5] предложена методика, заключающаяся в вакуумной фильтрации моторного масла, получении при помощи портативного микро-

скопа цифрового изображения фильтограммы и его сравнении с тремя эталонными изображениями (рис. 1), соответствующими работоспособному (рис. 1а), предаварийному (рис. 1б) и критическому (рис. 1в) состоянию моторного масла.

Данный метод предполагает только качественное сравнение состояния моторного масла и не позволяет определить размеры частиц загрязнений, их количество и форму, знание которых дает возможность оценить интенсивность изнашивания деталей и судить о процессах, происходящих в трибосопряжениях ДВС.

В работах [6, 7] предложен новый методический подход для анализа цифровых изображений результатов экспресс-тестирования моторного масла колориметрическими методами с использованием программного комплекса *ImageJ* [8]. Следует отметить, что данный комплекс также имеет расширенные возможности для анализа частиц на цифровых изображениях. Так, известно применение программы *ImageJ* для анализа размеров и формы частиц россыпного золота [9], для определения размеров частиц полиэфирного порошка и волокон вискозы [10], для оценки формы и размеров опасных полимерных частиц, загрязняющих окружающую среду [11, 12], для оцен-

ки распределения частиц гравия по размерам [13] и др. Приведенные примеры применения программного комплекса *ImageJ* показывают, что он может быть использован для анализа фильтограмм моторного масла, полученных методом мембранной фильтрации.

Цель настоящей работы – разработать методику и алгоритм определения размеров, количества и формы частиц на цифровом изображении фильтограммы моторного масла с использованием программного комплекса *ImageJ*.

Основная часть

Методика анализа частиц с использованием программы *ImageJ* основана на предлагаемом алгоритме (рис. 2), включающем три основные стадии: подготовка изображения, его сегментация и анализ частиц.

Первая стадия (подготовка изображения) включает в себя два этапа: непосредственное получение изображения и его предварительную обработку. Для получения изображений, которые можно обрабатывать в программе *ImageJ*, необходимо использовать различные устройства, такие как оптические, электронные (сканирующие и просвечивающие) и конфокальные микроскопы, цифровые камеры и камеры

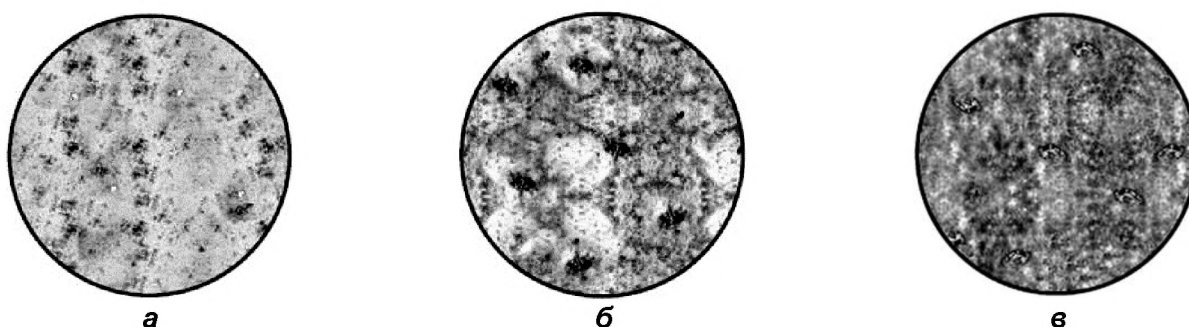


Рисунок 1. Изображения эталонных фильтограмм, соответствующих различному состоянию моторного масла: а – работоспособному; б – предаварийному; в – критическому

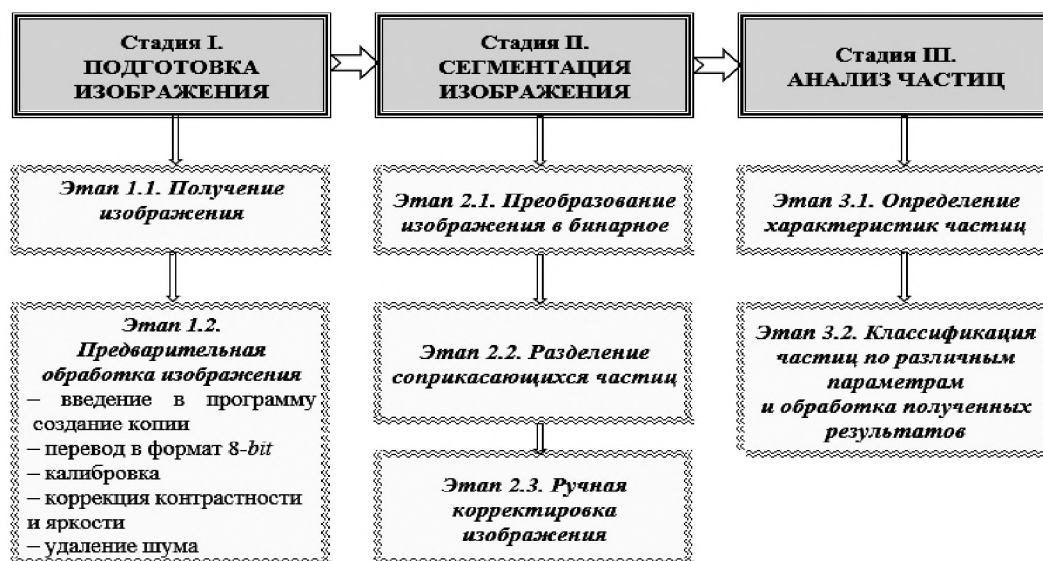


Рисунок 2. Алгоритм определения размеров, количества и формы частиц с использованием программы *ImageJ*

микроскопии, планшетные и специализированные (например, слайд-сканеры) сканеры. Программа *ImageJ* поддерживает множество форматов изображений, включая *TIFF*, *JPEG*, *PNG*, *BMP*, *GIF* и др. Предварительная обработка изображения предполагает введение изображения в программу *ImageJ*, создание копии изображения, перевод его в формат 8-bit, калибровку (масштабирование) изображения, коррекцию контрастности и яркости и использование различных фильтров для улучшения изображения.

Вторая стадия (сегментация изображения) включает три этапа: преобразование изображения в бинарное, разделение соприкасающихся частиц и ручная корректировка изображения.

Третья стадия (анализ частиц) также состоит из трех этапов: непосредственное определение характеристик частиц, классификация частиц по различным параметрам и обработка полученных результатов.

Рассмотрим возможность использования предложенного алгоритма для определения размеров, количества и формы продуктов износа на фильтрограмме моторного масла, полученной методом мембранной фильтрации. В качестве объекта исследования было выбрано цифровое изображение фрагмента (диаметр 3 мм) фильтрограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч (рис. 3) [4],

полученное с использованием портативного цифрового микроскопа *Discovery Artisan 32*.



Рисунок 3. Цифровое изображение фильтрограммы моторного масла

Согласно предложенному выше алгоритму, проанализируем цифровое изображение представленной фильтрограммы (стадия I, этап 1.1 (рис. 3)). На рисунке 4 представлена последовательность выполнения операций на стадии I (подготовка изображения) этапа 1.2 (предварительная обработка изображения).

На рисунке 5 показана последовательность операций обработки изображения на стадии II (сегментация изображения).

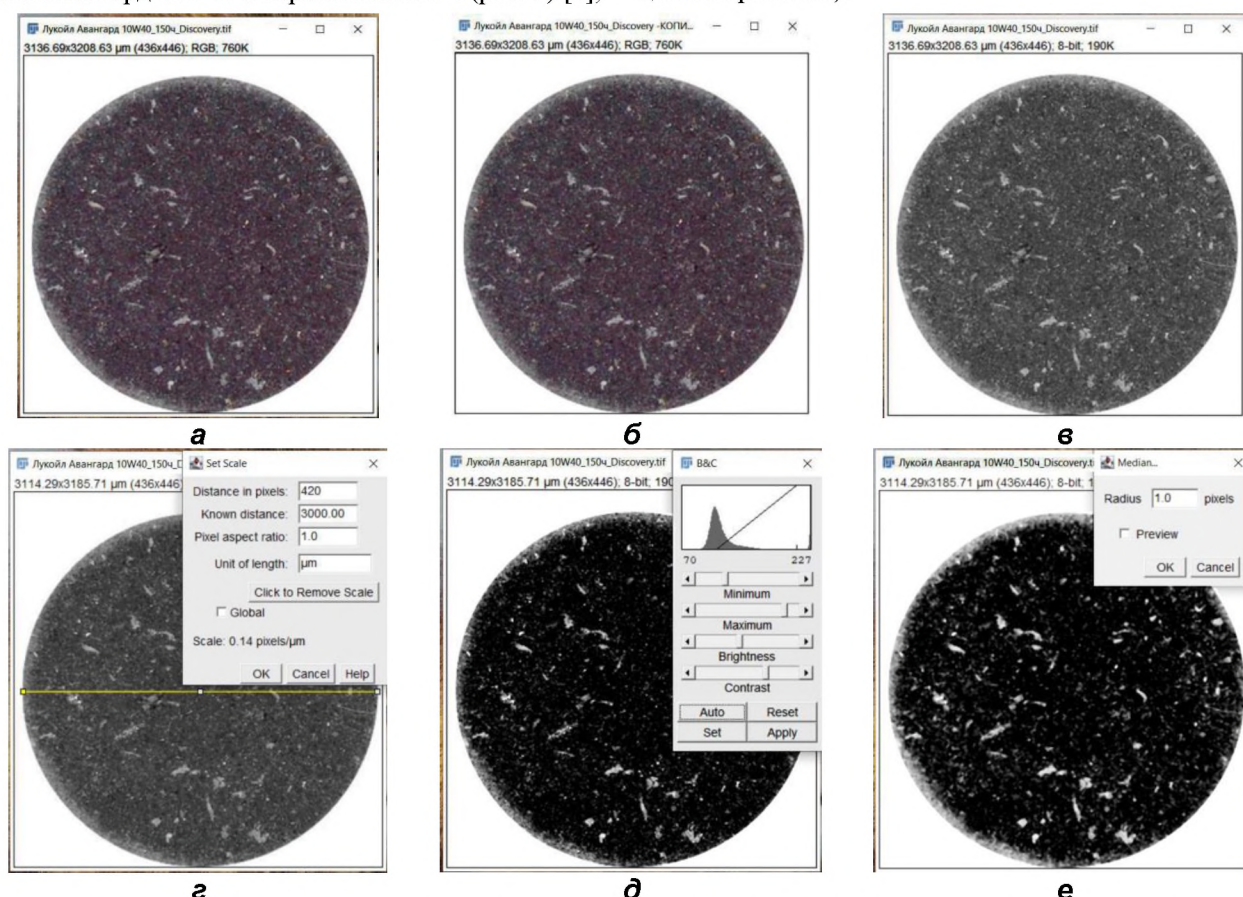


Рисунок 4. Последовательность выполнения операций на стадии I (подготовка изображения) этапа 1.2 (предварительная обработка изображения):

а – введение в программу; б – создание копии; в – перевод в формат 8-bit;
г – калибровка; д – коррекция контрастности и яркости; е – удаление шума

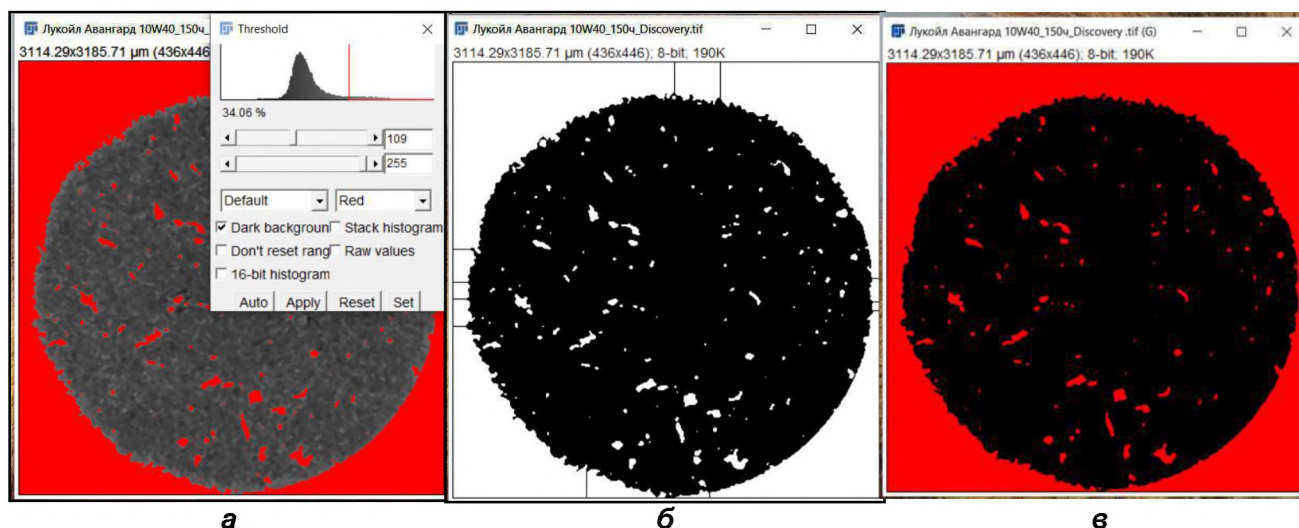


Рисунок 5. Последовательность выполнения операций на стадии II (сегментация изображения): а – этап 2.1 (преобразование изображения в бинарное); б – этап 2.2 (разделение соприкасающихся частиц); в – этап 2.3 (ручная корректировка изображения)

Результаты анализа частиц (стадия III) на этапе 3.1 (определение характеристик частиц) представлены на рисунке 6.

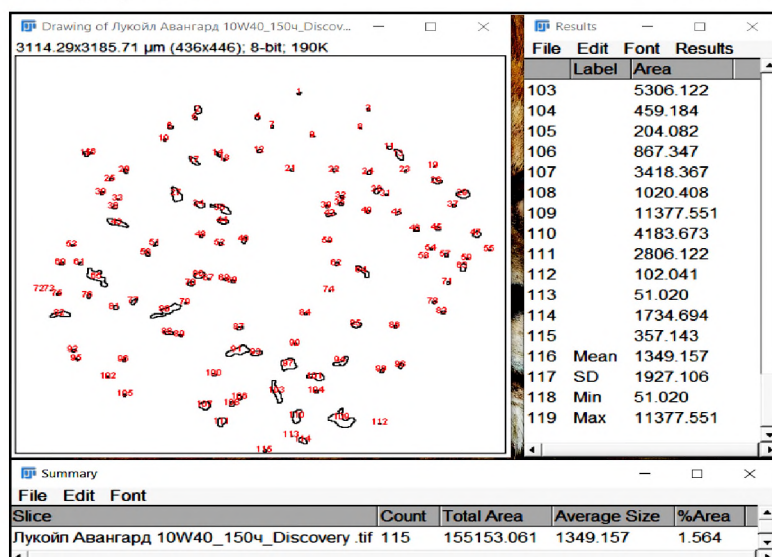


Рисунок 6. Результаты анализа частиц (стадия III, этап 3.1)

Классификация частиц по различным параметрам и обработка полученных результатов (согласно этапу 3.2) представлены на рисунках 7-10. При этом на рисунках 7, 8 приведены изображения частиц в различных диапазонах значений их размеров и сферичности соответственно, а на рисунках 9, 10 – гистограммы распределения частиц по этим параметрам.

Известно [15, 16], что процесс изнашивания трибосопряжений ДВС характеризуется следующим образом: присутствие частиц износа с размерами до 10 мкм характеризует процесс нормального изнашивания; до 100 мкм – сильного изнашивания; 100–1000 мкм – предаварийного изнашивания; более 1000 мкм – катастрофического изнашивания. Анализ полученных ре-

зультатов (рис. 9) показывает, что в исследуемом масле в значительном количестве (29 шт.) содержатся частицы износа с размерами 40-100 мкм, что может свидетельствовать о процессе сильного изнашивания, а наличие двух частиц с размерами более 100 мкм – о начале процесса предаварийного изнашивания.

Анализ полученных результатов (рис. 10) указывает на присутствие в значительном количестве частиц (96 шт.) с формой, близкой к сферической (сферичность в диапазоне 0,71 – 1,0), что может свидетельствовать о нормальном износе (например, от трения в подшипниках). Наличие частиц (8 шт) со сферичностью, равной 0,31 – 0,5, указывает на аномальный износ, такой как абразивный или усталостный, который может быть связан с поломкой или интенсивным изнашиванием.

Полученные результаты анализа цифрового изображения фильтрограммы моторного масла свидетельствуют о возможности использования предложенного алгоритма для определения размеров, количества и формы частиц загрязнений при обработке экспериментальных данных, полученных методом мембранной фильтрации непосредственно в условиях предприятий АПК.

Заключение

Предложен методический подход к анализу фильтрограмм моторного масла, основанный на использовании программного комплекса *ImageJ*, для реализации которого разработан алгоритм определения параметров частиц по полученным цифровым изображениям.

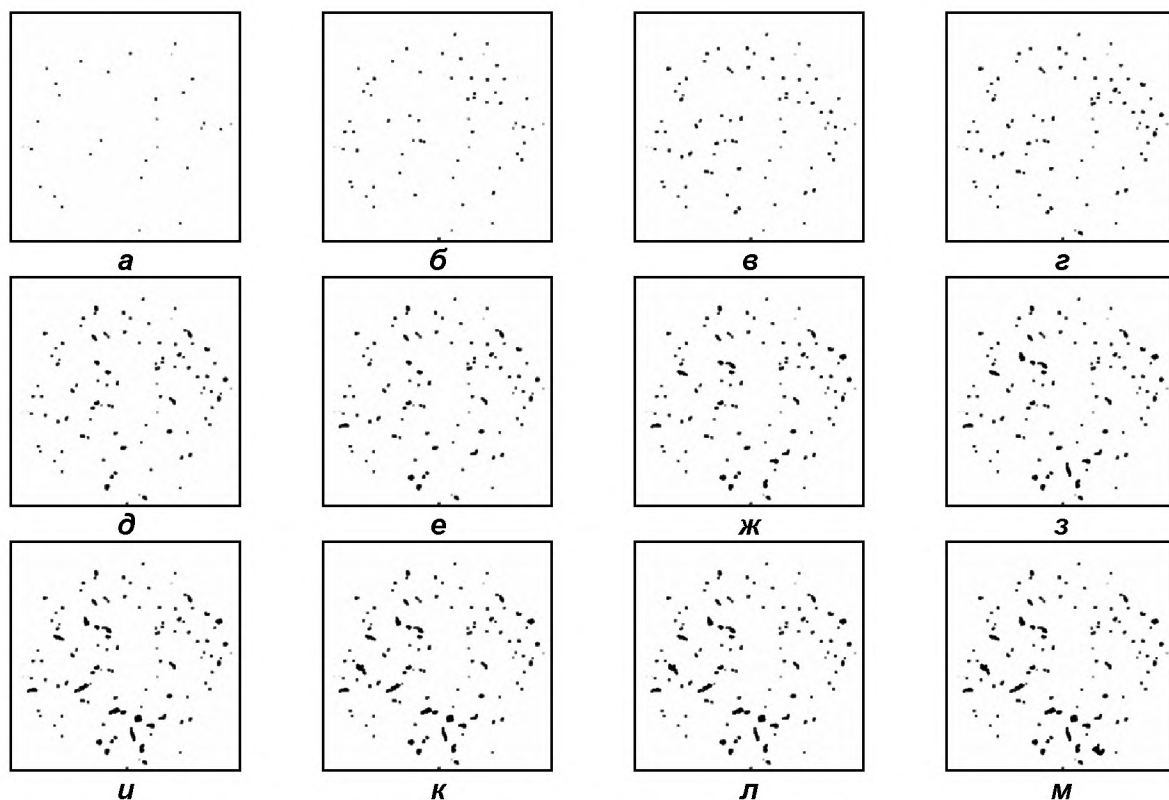


Рисунок 7. Изображения частиц в различных диапазонах значений их размеров, мкм (этап 3. 2):
а – ≤ 20 ; б – ≤ 30 ; в – ≤ 40 ; г – ≤ 50 ; д – ≤ 60 ; е – ≤ 70 ; ж – ≤ 80 ; з – ≤ 90 ; и – ≤ 100 ; к – ≤ 110 ; л – ≤ 120 ; м – ≤ 130

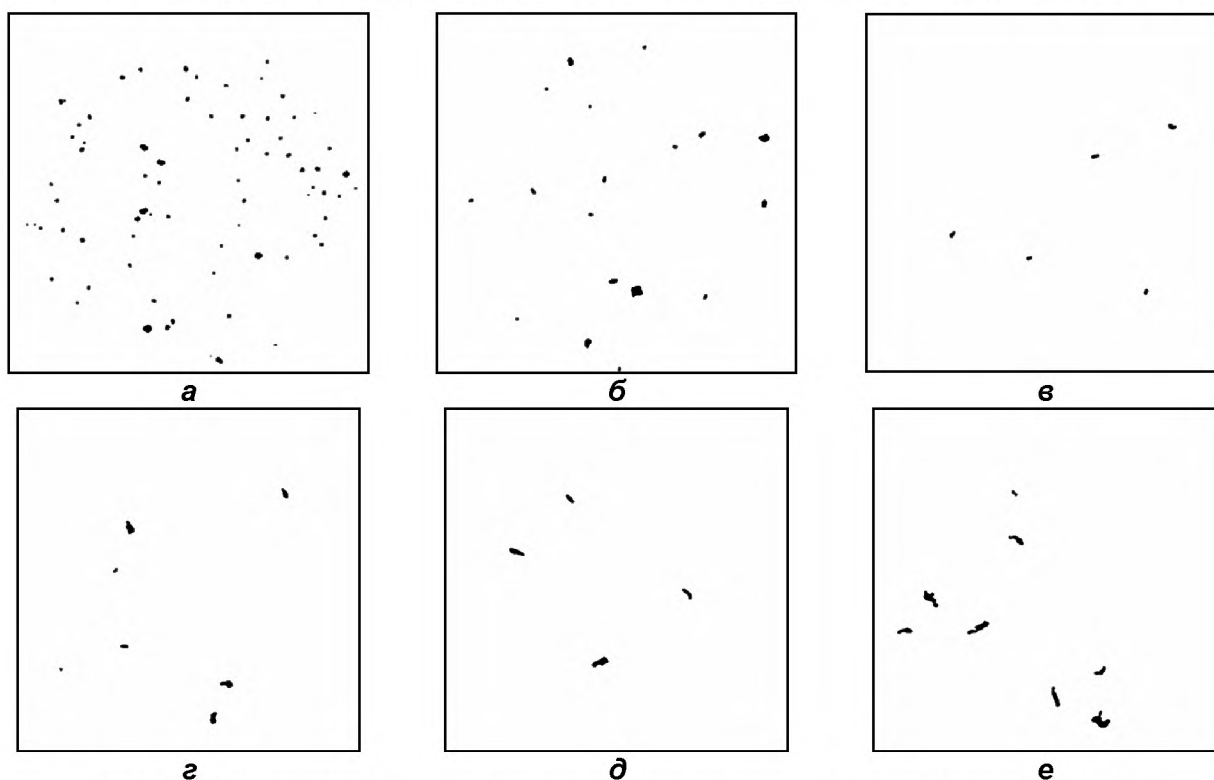


Рисунок 8. Изображения частиц в различных диапазонах значений их сферичности (этап 3. 2):
а – $0,91 \dots 1,0$; б – $0,81 \dots 0,9$; в – $0,71 \dots 0,8$; г – $0,61 \dots 0,7$; д – $0,51 \dots 0,6$; е – $0,31 \dots 0,5$

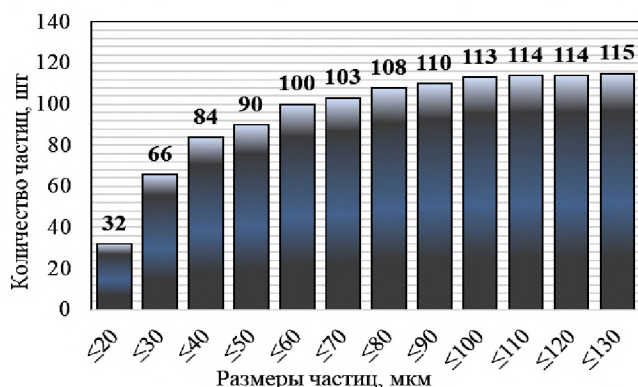


Рисунок 9. Гистограмма распределения частиц по размерам (этап 3. 2)

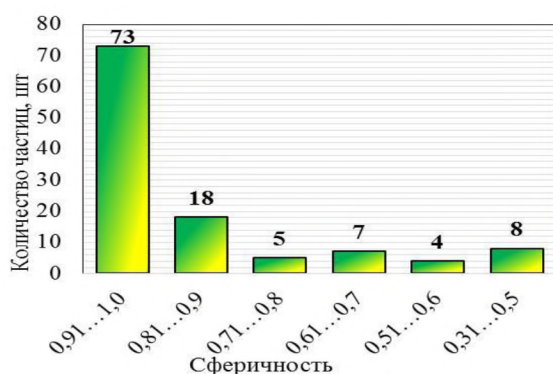


Рисунок 10. Гистограмма распределения частиц по сферичности (этап 3. 2)

Данный методический подход с использованием разработанного алгоритма, включающего три стадии: подготовку изображения, его сегментацию и анализ частиц, дает возможность определять размеры, количество и форму частиц по цифровым изображениям, позволяет отказаться от субъективного и трудоемкого анализа, в отличие от органолептических методов, и при этом может быть использован непосредственно в условиях предприятий АПК при проведении анализа изображений с высокой точностью за короткий промежуток времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: Химия, 1979. – 240 с.
2. Zhu, L. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 6653. – <https://doi.org/10.3390/s22176653>.
3. Standard Guide for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants: ASTM D7684-11 (Reapproved 2020). – ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. – United States, 2020. – 10 p.

4. Корнеева, В.К. Мембранная фильтрация – эффективный метод оценки наличия механических примесей в моторном масле работающего ДВС / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2024. – № 4. – С. 20-26.
5. Fitch, J.C. The Lubrication Field Test and Inspection Guide / J.C. Fitch // Noria Corporation. – 2000. – 36 p.
6. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 1. Колориметрические методы / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2024. – № 6. – С. 29-36.
7. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 2. Цветовые модели и возможности их применения при колориметрических методах / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, В.В. Остриков // Агропанорама. – 2025. – № 1. – С. 29-36.
8. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
9. Crawford, E.C. An ImageJ plugin for the rapid morphological characterization of separated particles and an initial application to placer gold analysis / E.C. Crawford, J.K. Mortensen // Computers & Geosciences. – 2009. – № 35. – P. 347-359.
10. Pico, D. Image Analysis for Simultaneous Determination of Spherical and Fibrous Particles / D. Pico, A. Bartl // Chemical Engineering Transaction. – 2011. – Vol. 24. – P. 619-624.
11. Tommaso, V. Image processing tools in the study of environmental contamination by microplastics: reliability and perspectives / V. Tommaso [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – № 30. – P. 298-309.
12. Chen, S. Quantification of microplastics by count, size and morphology in beverage containers using Nile Red and ImageJ / S. Chen [et al.] // Journal of Water and Health. – 2021. – № 19. 1. – P. 79-88.
13. Kumara, J. Image Analysis Techniques on Evaluation of Particle Size Distribution of Gravel / J. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // International Journal of GEOMAT. – 2021. – № 3(1). – P. 290-297.
14. Xu, D. Microstructure and corrosion resistance of Al3(Zr, Ti)/Al composite prepared by powder metallurgy // D. Xu, W. Long, X. Zhou // Advanced Composites Letters. – 2020. – Vol. 29. – P. 1-9.
15. Effect of debris size on the tribological performance of thermally sprayed coatings / K.A. Habib [et al.] // Tribology International. – 2020. – Vol. 143. – P. 106025. – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106025>.
16. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 6653. – <https://doi.org/10.3390/s22176653>.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.03.2025