

УДК 621.432/004.932

АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА НА ФИЛЬТРОГРАММЕ МОТОРНОГО МАСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАГИНА *EXTENDED PARTICLE ANALYZER* ПРОГРАММЫ *IMAGEJ*

Корнеева В.К., Капцевич В.М., Цымбалюк А.И.

Белорусский государственный аграрный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Показана возможность использования плагина *Extended Particle Analyzer* программы *ImageJ* для проведения морфологического анализа продуктов износа в моторном масле. Плагин *Extended Particle Analyzer* расширяет возможности встроенного инструмента *Analyze Particles* и позволяет использовать дополнительные параметры и гибкие настройки для более детального анализа формы, размера и ориентации частиц. Проведенный анализ частиц на цифровом изображении фильтрограммы моторного масла позволил оценить их количество, размеры и форму, характеризуемые различными параметрами, что позволило оценить характер и степень износа трибосопряжений двигателя.

Ключевые слова: моторное масло, фильтрограмма, продукты износа, *ImageJ*, *Extended Particle Analyzer*, количество, размеры, форма.

ANALYSIS OF WEAR PRODUCTS ON THE FILTERGRAM OF ENGINE OIL USING THE EXTENDED PARTICLE ANALYZER PLUGIN OF THE IMAGEJ PROGRAM

V.K. Korneeva, V.M. Kapsevich, A.I. Tsybalyuk

Belarusian State Agrarian Technical University
Minsk, Republic of Belarus

The possibility of using the Extended Particle Analyzer plugin of the ImageJ program for conducting a morphological analysis of wear products in engine oil is demonstrated. The Extended Particle Analyzer plugin expands the capabilities of the built-in Analyze Particles tool and allows using additional parameters and flexible settings for a more detailed analysis of the shape, size and orientation of particles. The analysis of particles on the digital image of the filtergram of engine oil made it possible to estimate their quantity, size and shape, characterized by various parameters, which made it possible to assess the nature and degree of wear of the engine tribounits.

Key words: motor oil, filtergram, wear products, ImageJ, Extended Particle Analyzer, quantity, dimensions, shape.

Наиболее опасными загрязнениями, влияющими на состояние моторного масла и работу двигателя, являются продукты износа его трибосопряжений [1]. Контролируя продукты износа в моторном масле и, при этом, определяя их размеры, количество и форму, можно судить о характере износа, оценить интенсивность изнашивания трибосопряжений, и, в конечном итоге, предотвратить выход ДВС из строя.

Одними из методов контроля за присутствием продуктов износа в моторном масле является метод мембранной фильтрации [2], заключающийся

в осаждении частиц из моторного масла на мембране с последующим анализом цифровых изображений фильтрограммы.

В работе [3] приведена методика определения размеров и количества продуктов износа на их цифровом изображении фильтрограммы с использованием стандартного встроенного инструмента *Analyze Particles* программы *ImageJ* [4]. Помимо этого стандартного инструмента программа позволяет дополнительно устанавливать для анализа частиц различные плагины, такие как *ParticleSizer*, *ND (Nearest Distances)*, *Extended Particle Analyzer*, *Custom Particle Analyzer* и др. [5]. Среди перечисленных плагинов наибольший интерес для анализа частиц износа представляет *Extended Particle Analyzer*», (расширенный анализатор частиц), который расширяет возможности встроенного инструмента *Analyze Particles* и позволяет использовать дополнительные параметры и гибкие настройки для более детального анализа формы, размера и ориентации частиц.

Целью настоящей работы является оценка возможности использования плагина *Extended Particle Analyzer* программы *ImageJ* для проведения морфологического анализа продуктов износа в моторном масле.

В качестве объекта исследования было выбрано цифровое изображение фрагмента (диаметр 3 мм) фильтрограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч (рисунок 1) [2], полученное с использованием портативного цифрового микроскопа *Discovery Artisan 32*.



Рисунок 1 – Цифровое изображение фильтрограммы моторного масла

Для анализа частиц на фильтрограмме моторного масла с использованием плагина *Extended Particle Analyzer*, необходимо провести предварительную подготовку анализируемого изображения. Подготовка включает следующие стадии: открытие изображения в программе *ImageJ* и создание его копии; перевод изображения в формат *8-bit*; масштабирование изображения; обрезка изображения; настройка яркости и контраста; удаление шума; бинаризация изображения; разделение соприкасающихся частиц; заполнение отверстий.

Открываем оригинальное изображение в программе *ImageJ* (*File* → *Open* → файл изображения) и делаем его копию (*Image* → *Duplicate*),

необходимую для ее сравнения с изображениями, преобразуемыми в процессе исследования (рисунок 2).

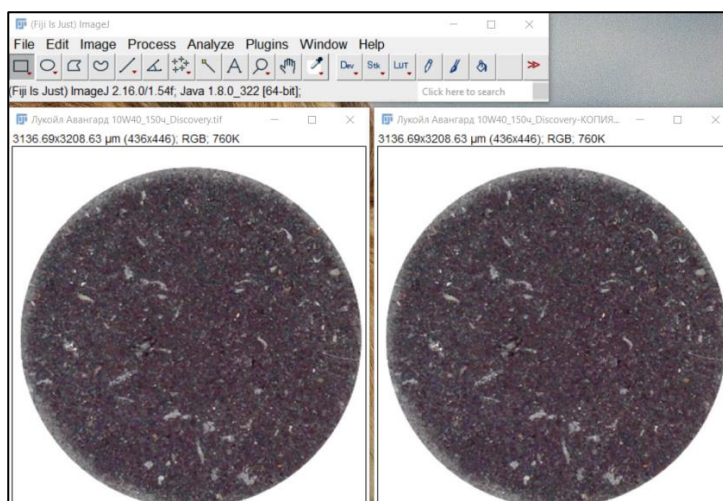


Рисунок 2 – Введение изображения в программу и создание его копии

Далее осуществляем перевод изображения в формат 8-bit (*Image* → *Type* → 8-bit) (рисунок 3). Следующим этапом проводим масштабирование изображения: выбираем инструмент «*Straight*» и проводим линию, равную диаметру фильтрограммы (3 мм), выполняем последовательность команд *Analyze* → *Set Scale* и в открывшемся окне устанавливаем *Known distance* – 3000, *Unit of length* (µm – мкм) (рисунок 4). Таким образом, после нажатия кнопки *OK*, все значения измерений величин геометрических объектов будут выражаться в мкм. Чтобы исключить области за пределами круга, проводим обрезку изображения: выбираем инструмент «*Oval*», проводим окружность и выполняем команды *Image* → *Crop* (рисунок не приводится). Для более четкого выделения светлых частиц на темном фоне проводим настройку яркости и контраста (*Image* → *Adjust* → *Brightness/Contrast*) (рисунок 5).

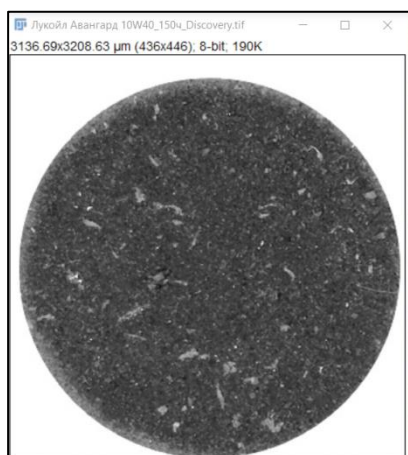


Рисунок 3 – Перевод цифрового изображения в

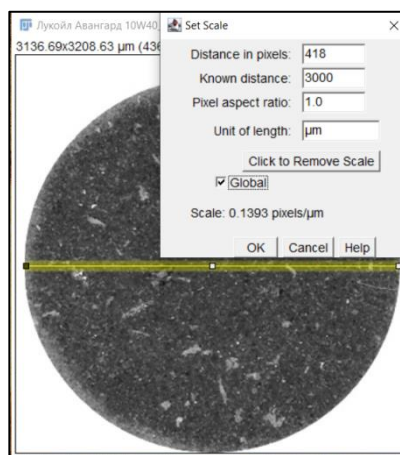


Рисунок 4 – Масштабирование

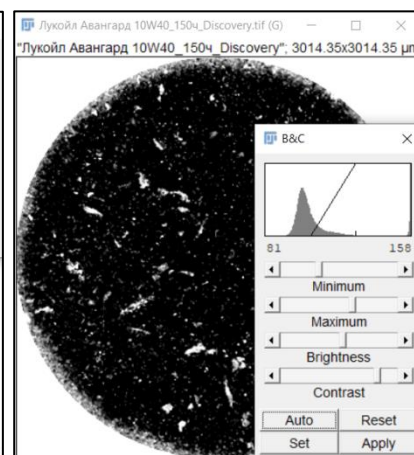


Рисунок 5 – Настройка яркости и контраста

Для удаления мелких фрагментов (шума) на изображении выбираем последовательность команд *Process* → *Noise* → *Despeckle* (рисунок 6). Далее проводим бинаризацию изображения команды (*Image* → *Adjust* → *Threshold*) и в открывшемся окне отмечаем режим *Dark Background* (темный фон) и цвет частиц – *Red*. Далее, нажатию кнопки *Apply*, переводим исследуемое изображение в бинарное черно-белое (рисунок 7). Разделение соприкасающихся частиц осуществляется автоматически путем выбора команд *Process* → *Binary* → *Watershed* (рисунок 8), а заполнение отверстий – *Process* → *Binary* → *Fill Holes* (частицы не содержат отверстий, и изображение совпадает с изображением на рисунке 8).

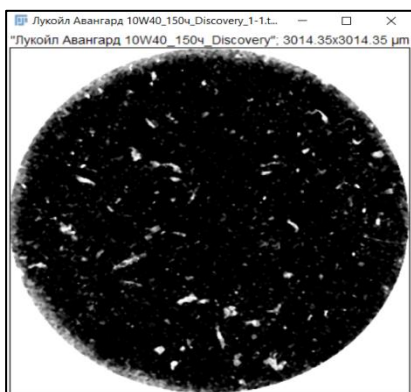


Рисунок 6 – Удаление шума

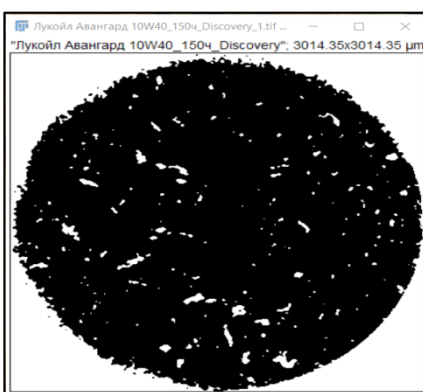


Рисунок 7 – Бинаризация изображения

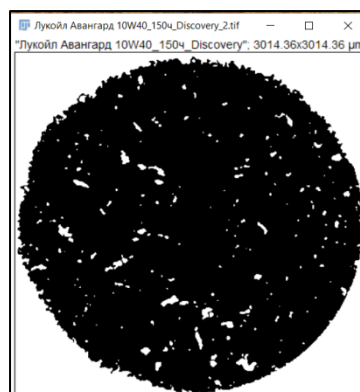


Рисунок 8 – Разделение соприкасающихся частиц

После проведения предварительной подготовки изображения запускаем плагин *Extended Particle Analyzer* (*Plugins* → *BioVoxxel* → *Extended Particle Analyzer*).

Для получения результатов расширенного анализа частиц установим определенные режимы и зададим диапазоны значений анализируемых морфологических характеристики в открывшемся окне плагина следующим образом (рисунок 9).

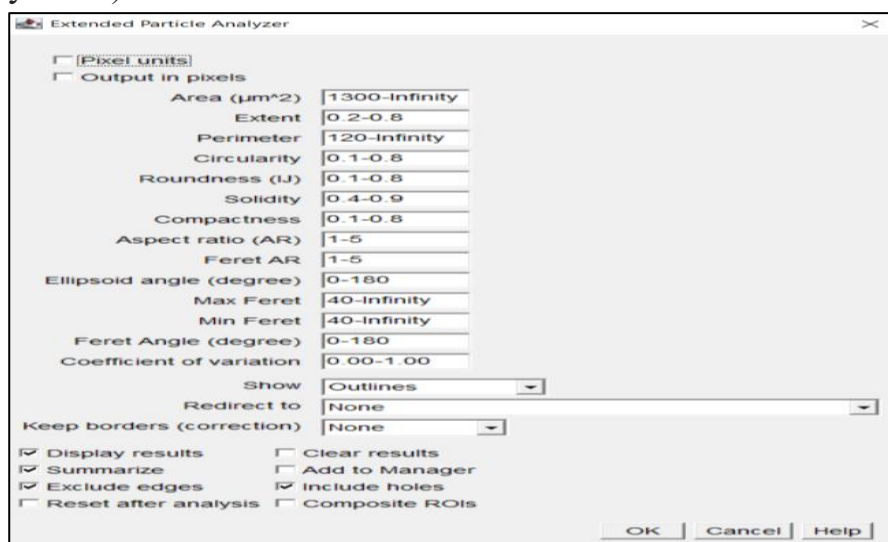


Рисунок 9 – Интерфейс основного окна плагина *Extended Particle Analyzer*

Отключаем опции *Pixel units* (пиксельные единицы) и *Output in pixels* (вывод в пикселях), т.к. ранее при подготовке изображения было проведено масштабирование в мкм.

Далее задаем значения морфологических величин, учитывая, что анализируемые частицы являются продуктами износа, следующим образом: параметр *Area* (μm^2) (площадь (мкм²)) – в диапазоне 1300–infinity мкм², соответствующем размерам частиц более 40 мкм; параметр *Extent* (степень заполнения) – в диапазоне 0,2–0,8, учитывая, что частицы износа имеют неправильную форму; параметр *Perimeter* (периметр) – в диапазоне 120–infinity; параметры *Circularity* (круговость) и *Roundness* (округлость) – в диапазоне 0,1–0,8, т.к. не все частицы имеют сферическую форму; параметр *Solidity* (сплошность) – в диапазоне 0,4–0,9 (частицы могут иметь вогнутости из-за неровности поверхности); параметр *Compactness* (компактность) – в диапазоне 0,1–0,8; параметр *Aspect ratio* (AR) (соотношение сторон) – в диапазоне 1,0–5,0, учитывая вытянутость частиц; параметры *Max Feret* (максимальный диаметр Фере) и *Min Feret* (минимальный диаметр Фере) – в диапазоне 40–infinity мкм; параметр *Feret AR* (соотношение Фере) – в диапазоне 1,0–5,0 (аналогично *Aspect ratio* (AR)); параметры *Ellipsoid angle* (*degree*) (угол эллипсоида (градус)) и *Feret Angle* (*degree*) (угол Фере (градус)) – в диапазоне 0–180, не учитывая ориентацию частиц; параметр *Coefficient of Variation* (коэффициент вариации) – в диапазоне 0–1,0, не учитывая разброс статистических данных.

Для окончательной обработки и вывода результатов анализа частиц фиксируем следующие опции. Выбираем режим **Outlines** (контуры) в опции *Show* (показывать), чтобы получить изображение контура частиц с номерами в отдельном окне. Отключаем опции **Redirect to** (перенаправить на) и **Keep borders (correction)** (сохраняйте границы (исправление)) путем выбора режима **None**. Отмечаем опции **Display results** (показать результаты) **Summarize** (суммировать), позволяющие вывести на экран в виде отдельных окон таблицу с результатами анализа для каждой частицы и сводную таблицу с общими статистическими данными для всех параметров, соответственно. Включаем опции **Exclude edges** (исключить края) для исключения частиц, обрезанных краями изображения и **Include holes** (включить отверстия) для учета присутствия отверстий и трещин на частице при расчете ее площади и других параметров. Остальные опции **Clear results** (очистить результаты), **Reset analysis** (сбросить анализ), **Add to Manager**

(добавить в менеджер) и *Composite ROIs* (составные области интереса) оставляем неотмеченными.

После нажатия кнопки *Ok* получаем результаты анализа частиц с конкретными выбранными выше параметрами в виде трех отдельных окон: **Summary** – таблица средних значений анализируемых морфологических характеристик частиц (рисунок 10); *Drawing of Mask* – изображение контуров частиц с номерами; **Results** – таблица значений анализируемых морфологических характеристик каждой частицы.

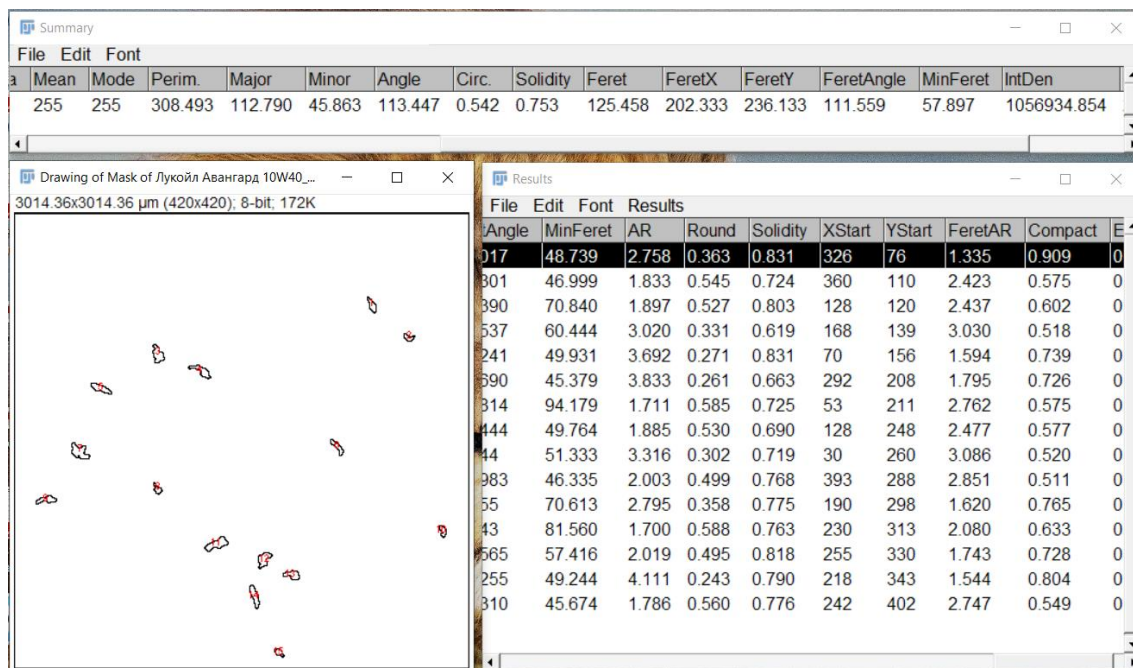


Рисунок 10 – Вывод результатов в виде трех отдельных окон

Анализ полученных результатов показывает, что в заданных нами диапазонах размеров и формы частиц их количество составило 15 шт, при этом их размеры, например, *Max Feret* и *Min Feret*, находятся в диапазонах 75–167 мкм и 47–60 мкм, соответственно, а их форма, характеризуемая параметрами, например, *Feret AR*, **Circularity** и **Solidity**, – в диапазонах 1,34–3,09, 0,36–0,72 и 0,62–0,83, соответственно.

На рисунке 11 в качестве примера приведены значения *Max Feret* по возрастаню, и соответствующие им значения *Min Feret* и **Circularity**.

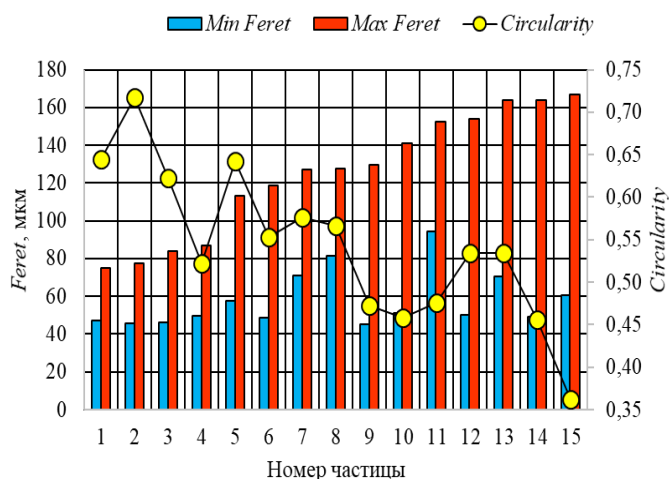


Рисунок 11 – Взаимосвязь *Max Feret*, *Min Feret* и *Circularity*

Анализ представленных зависимостей (рисунок 11) показывает отсутствие четкой зависимости между значениями *Max Feret* и *Min Feret*, что указывает на присутствие частиц различной формы: от округлых до вытянутых. С увеличением *Max Feret* *Circularity* уменьшается, т.е. крупные частицы имеют более вытянутую или неправильную форму. Наличие частиц с *Max Feret* менее 100 мкм (1 – 4) и *Circularity* в диапазоне 0,52–0,72 может свидетельствовать о нормальном износе, например, от трения в подшипниках. Присутствие крупных частиц с *Max Feret* более 150 мкм и *Circularity* в диапазоне 0,36–0,53 (11 –15) указывает на аномальный износ, такой как абразивный или усталостный, который может быть связан с поломкой или интенсивным изнашиванием.

Проведенный пример анализа показывает, что рассмотренный плагин *Extended Particle Analyzer* может быть применен для углубленного и достоверного анализа частиц износа в моторном масле с определением количества, размеров и формы, характеризующихся различными параметрами, что, в конечном итоге, позволяет охарактеризовать характер и степень износа трибосопряжений ДВС.

Список литературы

1. Капцевич, В.М. Экспресс-методы контроля свойств моторного масла автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях агропромышленного комплекса / В. М. Капцевич, С.К. Карпович, В.К. Корнеева, И.В. Закревский. – Минск: БГАТУ, 2023. – 118 с.
2. Корнеева, В.К. Мембранная фильтрация – эффективный метод оценки наличия механических примесей в моторном масле работающего ДВС / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич, И.В. Закревский, П.М. Спиридович, В.В. Остриков // Агропанорама. – 2024. – № 4. – С. 20-26.
3. Корнеева, В.К. Методика определения размеров и количества частиц износа / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Теория и практика современной аграрной науки: Сб. VIII национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием (г. Новосибирск, 24 февраля 2025 г.) / Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2025. – С. 1322-1326.
4. Ferreira, T. ImageJ User Guide /Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
5. Schindelin, J. The ImageJ Ecosystem: An Open Platform for Biomedical Image Analysis / J. Schindelin, C.T. Rueden, M.C. Hiner, K.W. Eliceiri // Molecular Reproduction & Development. – 2015. – V. 82. – P.518-529.