

Список использованной литературы

1. Капцевич, В.М. Экспресс-методы контроля свойств моторного масла автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях организаций агропромышленного комплекса / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2023. – 120 с.
2. Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispersancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method: ASTM D7899-19. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. – 7 p.
3. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
4. Сидоров, В.А. Техническая диагностика механического оборудования: учебник / В.А. Сидоров. – Москва: Инфра-Инженерия, 2021. – 256 с.
5. Амелин, В.Г. Хроматографические методы анализа: практикум / В.Г. Амелин; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 72 с.
6. Gołębiowski, W. Preventive maintenance in urban public transport: the role of engine oil analysis / W. Gołębiowski, A. Wolak, G. Zając // *Scientific Reports*. – 2024. – V. 14. – Article 30894.
7. Haralick, R.M. Textural features for image classification / R.M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1973. – Vol. SMC-3. – № 6. – P. 610-621.
8. Richardson, L.F. The problem of contiguity: an appendix to Statistics of Deadly Quarrels / L.F. Richardson // *Gen. Sys. Yearbook*. – 1961. – Vol. 6. – P. 139-187.
9. Souza, P.V.S. A simple and didactic method to calculate the fractal dimension – an interdisciplinary tool / P.V.S. Souza, R.L. Alves, W.F. Balthazar // *arXiv :Physics Education*. – 2018. – P. 1-7.

Summary. This article presents an overview of modern capabilities for analyzing motor oil chromatograms using computer vision tools. The limitations of traditional visual methods for assessing chromatograms are discussed, and the need to transition to instrumental analysis is substantiated. The capabilities of ImageJ software for performing morphological analysis of chromatogram zones, colorimetric assessment of their color, texture analysis using a GLCM gray-level co-occurrence matrix, and fractal analysis are described in detail. A comparative analysis of existing approaches is provided, and the advantages of comprehensive multiparameter analysis of digital chromatogram images for assessing the condition of motor oils are described.

УДК 621.432/004.932

Корнеева В.К., кандидат технических наук, доцент;

Капцевич В.М., доктор технических наук, профессор

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА *GLCM* В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *IMAGEJ* ДЛЯ ОЦЕНКИ ХРОМАТОГРАММ МОТОРНОГО МАСЛА

Аннотация. Рассмотрены методические возможности применения текстурного анализа цифровых изображений на основе матрицы совместной встречаемости

уровней серого (*GLCM*), реализованного в плагине *GLCM Texture* программного комплекса *ImageJ*, для оценки текстуры хроматограмм моторного масла. Приведено математическое описание алгоритма построения *GLCM* и расчета основных текстурных параметров: углового второго момента, контраста, корреляции, обратного разностного момента и энтропии. Выполнена физическая интерпретация указанных параметров применительно к характерным зонам масляного пятна.

Abstract. This paper examines the potential of using digital image texture analysis based on the gray-level co-occurrence matrix (GLCM), implemented in the GLCM Texture plugin of the ImageJ software package, to assess the texture of motor oil chromatograms. A mathematical description of the GLCM construction algorithm and calculation of the key texture parameters – angular second moment, contrast, correlation, inverse difference moment, and entropy – is provided. A physical interpretation of these parameters is provided for characteristic zones of an oil slick.

Ключевые слова. Капельная проба, моторное масло, хроматограмма, текстурный анализ, *GLCM*, *ImageJ*.

Keywords. Blotter Spot, motor oil, chromatogram, texture analysis, GLCM, ImageJ.

Эксплуатация дизельных двигателей внутреннего сгорания сопровождается накоплением в моторном масле продуктов окисления, загрязняющих частиц различного происхождения и продуктов износа деталей. Своевременная диагностика состояния смазочных материалов позволяет предотвратить аварийные отказы двигателя, оптимизировать межсервисные интервалы и снизить эксплуатационные затраты.

Традиционные методы анализа моторных масел, основанные на физико-химических испытаниях и спектральном определении элементного состава, требуют специализированного оборудования, значительного времени и высокой квалификации персонала. В этих условиях актуальной является разработка экспресс-методов оценки состояния масел, которые могут быть реализованы в полевых условиях без сложного лабораторного оборудования. Одним из таких экспресс-методов является метод капельной пробы, основанный на растекании капли моторного масла по фильтровальной бумаге и формировании концентрических зон, размеры, окрашивания и текстура которых различна в зависимости от времени их работы. Нами разработаны методы оценки размеров и окрашивания зон с использованием плагинов и инструментов *Find Edges*, *Interactive 3D Surface Plot*, *Radial Profile*, *Color Inspector 3D* программного комплекса *ImageJ* [1], описанные в работах [2–4]. В то же время, нерешенная задача оценки текстуры зон масляного может быть решена с помощью плагина *GLCM Texture* программного комплекса *ImageJ*.

Целью работы является анализ и обоснование методических возможностей применения текстурного анализа на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого (*GLCM*), реализованного в плагине *GLCM Texture*, для количественного описания текстуры хроматограмм моторных масел.

Матрица совместной встречаемости уровней серого (*GLCM*) является одним из наиболее широко применяемых методов описания текстуры цифровых изображений. Концепция *GLCM* была впервые предложена *Haralick R.M.* в 1973 г. [5] для анализа аэрофотоснимков и в настоящее время нашла применение в различных областях обработки изображений: медицинской диагностике, дистанционном зондировании, анализе материалов, контроле качества продукции и др. [6–9].

Математически нормализованная *GLCM* представляет собой квадратную матрицу размером $N \times N$, где N – количество уровней градаций серого анализируемого изображения. Каждый элемент матрицы $P(i, j)$ определяется как вероятность совместного появления пары пикселей с уровнями яркости i и j , расположенных на заданном расстоянии d и в заданном направлении θ .

Формула для вычисления элемента *GLCM* имеет следующий вид:

$$P(i, j | d, \theta) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \begin{cases} 1 & \text{если } I(x, y) = i \text{ и } I(x + \Delta x, y + \Delta y) = j \\ 0 & \text{если } I(x, y) \neq i \text{ и } I(x + \Delta x, y + \Delta y) \end{cases}}{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \begin{cases} 1 & \text{если } I(x, y) = i \text{ и } I(x + \Delta x, y + \Delta y) = j \\ 0 & \text{если } I(x, y) \neq i \text{ и } I(x + \Delta x, y + \Delta y) \end{cases}},$$

где: $I(x, y)$ – интенсивность пикселя с координатами (x, y) ;

Δx и Δy – смещение, определяемое расстоянием d и направлением θ ;

M, N – размеры изображения в пикселях;

L – количество уровней градаций серого ($L = 256$ для 8-bit).

Нормализованная *GLCM* представляет собой матрицу вероятностей, сумма всех элементов которой равна единице. Нормализация обеспечивает инвариантность результатов к размеру анализируемой области и общему числу пар пикселей.

Плагин *GLCM Texture* реализует стандартный алгоритм вычисления *GLCM* и набора производных текстурных статистик. Для настройки анализа необходимо задать следующие параметры в диалоговом окне плагина.

Расстояние d (строка «*Enter the size of the step in pixels*») – определяет смещение (в пикселях) между парой анализируемых пикселей при построении *GLCM*. Малые значения (1–3 пикселя) чувствительны к мелко-масштабным вариациям яркости, связанным с отдельными мелкими частями. Средние значения (5–10 пикселей) характеризуют текстурные паттерны среднего масштаба и агломераты. При анализе хроматограмм масляных пятен расстояние d следует выбирать минимальным ($d = 1$).

Направление θ (строка «*Select the direction of the step*») – задает направление (угол в градусах) между горизонтальной осью и направлением смещения. Плагин позволяет вычислить *GLCM* для четырех основных направлений: 0° , 90° , 180° , 270° . Для хроматограмм масляных пятен, обладающих радиальной симметрией, необходимо использовать усреднение

по всем направлениям для получения инвариантных к ориентации результатов ($\theta = 0 \text{ degrees}$).

На основе нормализованной *GLCM* плагин вычисляет следующие пять текстурных статистических параметров изображения.

Angular Second Moment (угловой второй момент) *ASM* – характеризует степень упорядоченности текстуры:

$$ASM = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} [P(i, j)]^2.$$

Максимальное значение *ASM*, равное 1, достигается, когда все элементы *GLCM* сосредоточены в одной точке (все пиксели имеют одинаковую яркость). Минимальные значения соответствуют равномерному распределению элементов матрицы, что характерно для случайной, неупорядоченной текстуры. Высокие значения *ASM* указывают на однородную, упорядоченную структуру анализируемой области: чистое масло характеризуется более высокими значениями *ASM*, поскольку текстура базового масла на фильтровальной бумаге однородна. По мере накопления загрязнений структура становится более хаотичной, что приводит к снижению *ASM*.

Contrast (контраст) – характеризует локальную изменчивость интенсивности окрашивания:

$$Contrast = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - j)^2 P(i, j).$$

Контраст измеряет разницу в интенсивности окрашивания (квадрат разности уровней серого) между соседними пикселями, взвешенную по вероятности их совместного появления. Высокие значения контраста указывают на наличие резких перепадов яркости – «крутых» границ между светлыми и темными областями. Нулевое значение контраста соответствует изображению с постоянной яркостью. Высокие значения контраста на хроматограмме характерны для зон с высокой концентрацией крупных частиц, создающих неоднородное распределение оптической плотности. Ядро масляного пятна обычно имеет повышенный контраст вследствие наличия крупных агломератов с резкими границами. Диффузионная зона, напротив, характеризуется более равномерным распределением мелкодисперсной сажи и, следовательно, меньшими значениями контраста.

Correlation (корреляция) – мера линейной зависимости между уровнями интенсивности окрашивания:

$$Correlation = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - \mu_i)(j - \mu_j) P(i, j)}{\sigma_i \sigma_j},$$

где μ_i, μ_j – средние значения частных распределений;

σ_i, σ_j – их стандартные отклонения.

Корреляция показывает степень линейной связи между значениями интенсивности окрашивания пары пикселей. Значение +1 указывает на полную положительную линейную зависимость (интенсивность окрашивания пары пикселей изменяется синхронно). Значение 0 указывает на отсутствие линейной корреляции. Отрицательные значения возможны для инвертированных текстур. Высокая корреляция на хроматограмме масляного пятна свидетельствует о постепенных, плавных пространственных вариациях концентрации загрязнений. Резкое снижение корреляции указывает на наличие дискретных структур – отдельных частиц или агломератов, контрастирующих с окружающим фоном.

Inverse Difference Moment (обратный разностный момент) *IDM* – локальная однородность (гомогенность) изображения определяется по формуле:

$$IDM = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{P(i, j)}{1 + (i - j)^2}.$$

Высокие значения *IDM* указывают на преобладание пар пикселей с близкими уровнями яркости ($|i-j|$ мало), что соответствует гладким, равномерно окрашенным областям без резких перепадов. Максимальное значение $IDM = 1$ достигается для изображения, в котором все пиксели имеют одинаковое значение интенсивности окрашивания. Для хроматограммы чистого масла характерны высокие значения *IDM*, свидетельствующие об однородном распределении поглощающего материала. По мере накопления загрязнений *IDM* снижается вследствие увеличения доли пар пикселей с различной интенсивностью окрашивания. Значение *IDM* ядра должно быть более низким по сравнению с диффузионной зоной.

Entropy (энтропия) – мера хаотичности и неоднородности текстуры определяется по формуле:

$$Entropy = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P(i, j) \log_2 P(i, j),$$

при этом $P(i, j) \log_2 P(i, j) = 0$ при $P(i, j) = 0$.

Энтропия достигает максимума при равномерном распределении элементов *GLCM*, когда все элементы матрицы имеют примерно одинаковую вероятность. Это соответствует максимальной случайности и информационной сложности текстуры. Минимальные значения энтропии характерны для упорядоченных, предсказуемых текстур. Для хроматограмм моторных масел высокая энтропия указывает на сложную, неоднородную структуру, обусловленную наличием частиц различного размера и формы. Чистое масло характеризуется более низкими значениями энтропии. Диффузионная зона может иметь повышенную энтропию вследствие случайного распределения мелких частиц сажи.

В работе проведен анализ возможностей применения текстурного анализа изображений на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого, реализованного в программной среде *ImageJ*. Показано, что параметры *GLCM* обладают информативностью для описания текстуры хроматограмм масляного пятна и имеют четкую физическую интерпретацию, связанную с распределением загрязнений и продуктами деградации масла.

Использование плагина *GLCM Texture* позволяет формализовать анализ текстуры и перейти от качественной визуальной оценки к количественным характеристикам. При этом определены ключевые параметры (*ASM*, контраст, корреляция, *IDM*, энтропия), которые потенциально могут быть использованы в качестве диагностических показателей.

Таким образом, текстурный анализ на основе *GLCM* является перспективным инструментом для развития цифровых методов обработки изображений масляных пятен. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на экспериментальную верификацию и разработку количественных критериев оценки состояния моторных масел.

Список использованной литературы

1. Ferreira, T. ImageJ user guide / Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.
2. 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.
3. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 5. Цифровая обработка хроматограмм моторного масла, полученных методом капельной пробы / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2025. – № 6. – С. 29-36.
4. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 6. Альтернативная бесприборная методика оценки свойств моторного масла согласно ASTM D7899 / В.К. Корнеева, В.М. Капцевич // Агропанорама. – 2026. – № 1. – С. 28-33.
5. Haralick, R.M. Textural features for image classification / R.M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1973. – Vol. SMC-3. – № 6. – P. 610-621.
6. Materka, A. On the effect of image brightness and contrast nonuniformity on statistical texture parameters / A. Materka, M. Strzelecki // Foundations of computing and decision sciences. – 2015. – Vol. 40. – № 3. – P. 163-184.
7. Фраленко, В.П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли / В.П. Фраленко // Программные системы: теория и приложения. – 2014. – № 4(22). – С. 19-39.

8. Мокрова, С.М. Сравнительное исследование методов представления результатов текстурного анализа поликристаллических материалов / С.М. Мокрова, В.Н. Милич // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Том 21. – № 1. – С. 23–32.

9. Haddad, Y.M. Food texture analysis in quality evaluation and product development / Y.M. Haddad // Journal of Food Science Research. – 2025. – № 10 (2). P. 1-2.

Summary. This paper analyzes the potential of image texture analysis based on a gray-level co-occurrence matrix, implemented in the ImageJ software environment. It is shown that GLCM parameters are informative for describing the texture of oil slick chromatograms and have a clear physical interpretation related to the distribution of contaminants and oil degradation products. Using the GLCM Texture plugin allows for formalizing texture analysis and moving from a qualitative visual assessment to quantitative characteristics. Key parameters (ASM, contrast, correlation, IDM, entropy) that can potentially be used as diagnostic indicators are identified.

УДК 621.432/004.932

Корнеева В.К., кандидат технических наук, доцент;
Капцевич В.М., доктор технических наук, профессор;
Пернач Е.Е.; Королец И.С.; Селицкий Е.И., студенты
*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХРОМАТОГРАММ МОТОРНОГО МАСЛА ЛУКОЙЛ АВАНГАРД 10W-40 В RGB-ПРОСТРАНСТВЕ

Аннотация. Представлены результаты исследования возможностей экспресс-диагностики моторного масла Лукойл Авангард 10W-40 с применением колориметрического анализа. Для измерения RGB-характеристик в кольцевых зонах хроматограмм моторного масла с различной наработкой использован плагин *Color Inspector 3D* программы *ImageJ*. Установлены корреляционные зависимости между цветовыми параметрами и степенью деградации масла. Определены пороговые значения RGB-компонентов для оценки технического состояния масла.

Abstract. The results of a study examining the rapid diagnostic capabilities of Lukoil Avangard 10W-40 motor oil using colorimetric analysis are presented. The Color Inspector 3D plugin of ImageJ was used to measure RGB characteristics in the annular zones of chromatograms of motor oils with different mileage levels. Correlations between color parameters and the degree of oil degradation were established. Threshold values for RGB components for assessing the technical condition of the oil were determined.

Ключевые слова. Хроматограмма моторного масла, колориметрия, RGB-анализ, экспресс-диагностика, *ImageJ*, *Color Inspector 3D*, деградация масла.

Keywords. Motor oil chromatogram, colorimetry, RGB analysis, express diagnostics, ImageJ, Color Inspector 3D, oil degradation.