

ные композиционные материалы показали линейный износ в несколько раз меньше, даже без дополнительной смазки.

Заключение. Проведенные исследования показали, что износостойкость и твердость ЛКМ могут быть существенно увеличены путем изменения технологических параметров их получения. Твердость возрастает в 1,5 -1,7 раза, а линейный износ ЛКМ, армированных ДЛЧ -1, по сравнению с бронзой уменьшился в 6 - 7 раз.

Список использованной литературы

- 1.КалиниченкоВ.А., Андрушевич А.А. Литые композиционные материалы: состояние и перспективы получения. Литейщик России №2. 2023. с. 27-36.
- 2.A. Kalinichenko, U. Kalinichenko, I. Voitov, V. Luhin. Formation of the Transition Zone "Matrix Alloy – Reinforcing Granules" in the Process of Solid-Liquid Synthesis of Composite Material.International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy 2023; 8(1). P. 9-14.

Summary. Research has shown that the wear resistance and hardness of paints and varnishes can be significantly increased by changing the production parameters. Hardness increases by 1.5-1.7 times, while the linear wear of paints and varnishes reinforced with DLC-1 decreases by 6-7 times compared to bronze.

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

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ХРОМАТОГРАММ МОТОРНОГО МАСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация. Представлен обзор современных возможностей анализа хроматограмм моторного масла с использованием инструментов компьютерного зрения. Детально описаны возможности программы *ImageJ* для проведения морфологического анализа зон хроматограммы, колориметрической оценки их окраски, текстурного анализа с использованием *GLCM*-матрицы совместной встречаемости уровней серого и фрактального анализа.

Abstract. This article presents an overview of modern capabilities for analyzing motor oil chromatograms using computer vision tools. It describes in detail the capabilities of *ImageJ* 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.

Ключевые слова. Моторное масло, хроматограмма масляного пятна, компьютерное зрение, *ImageJ*, текстурный анализ, фрактальный анализ, матрицы *GLCM*.

Keywords. Motor oil, oil slick chromatogram, computer vision, ImageJ, texture analysis, fractal analysis, GLCM matrices.

Контроль технического состояния моторных масел является важной составляющей системы технического обслуживания и ремонта двигателей внутреннего сгорания. Своевременная и точная оценка состояния масла позволяет предотвратить преждевременный износ деталей двигателя, снизить затраты на ремонт и обеспечить надежную эксплуатацию автотракторной техники [1].

Одним из наиболее доступных и простых экспресс-методов анализа состояния моторных масел является метод капельной пробы (*Blotter Spot Test*) [2]. Данный метод отличается простотой выполнения, низкой стоимостью и возможностью получения экспресс-оценки состояния масла без использования сложного лабораторного оборудования. Однако традиционный подход к интерпретации хроматограмм, предполагающий визуальную оценку, существенно ограничивает объективность и воспроизводимость результатов.

В последние годы развитие методов компьютерного зрения открывает новые возможности для автоматизации и объективизации анализа хроматограмм. Цифровая обработка изображений позволяет не только повысить точность измерений, но и извлекать из хроматограмм информацию, недоступную при визуальном анализе – текстурные характеристики, фрактальные параметры, градиенты интенсивности окраски [3].

Целью настоящей работы является систематизация и анализ современных возможностей использования инструментов компьютерного зрения для анализа цифровых изображений хроматограмм моторных масел с использованием свободно распространяемого программного обеспечения *ImageJ*.

Традиционный подход к интерпретации хроматограмм масляного пятна предполагает визуальную оценку двух основных параметров: размеров зон и интенсивности их окраски. При этом оценка проводится по качественной шкале, а результаты фиксируются в описательной форме. Такой подход имеет существенные ограничения, подробно описанные в работах [1, 4].

При визуальной оценке размеров зон хроматограммы человек сталкивается с рядом субъективных факторов. Границы зон на хроматограмме нередко являются размытыми и нечеткими, что делает затруднительным точное определение диаметра или площади зоны невооруженным глазом. Различные исследователи могут по-разному интерпретировать границы зон вследствие индивидуальных особенностей зрительного восприятия, утомляемости и психологических факторов. Исследования показывают, что погрешность визуального определения диаметров зон хроматограммы может составлять от 10 до 25 % [5].

Не менее проблематичной является визуальная оценка окраски зон хроматограммы. Интенсивность цветовых оттенков воспринимается чело-

веческим глазом нелинейно и зависит от множества факторов: типа и интенсивности освещения, угла падения света, фонового цвета поверхности, на которой расположена хроматограмма, и индивидуальных особенностей цветовосприятия оператора. Шкалы визуального сравнения окраски, даже при их формализованном использовании, не обеспечивают достаточной точности и воспроизводимости результатов.

Существенным недостатком визуальной оценки является также невозможность ее стандартизации и документирования в объективной форме. Кроме того, визуальная оценка не позволяет выявлять тонкие градиенты интенсивности окраски в пределах одной зоны, которые могут нести важную диагностическую информацию о составе и состоянии масла.

Современные исследования показали [6], что метод капельной пробы в сочетании с инструментальными методами позволяет эффективно диагностировать техническое состояние двигателей. Однако для полной объективизации метода необходим переход к цифровым методам анализа изображений.

Программный комплекс *ImageJ* представляет собой мощный инструмент для анализа цифровых изображений, широко используемый в научных исследованиях для обработки и количественного анализа изображений различного происхождения [3]. Разработанный в Национальном институте здравоохранения США (*NIH*), этот комплекс предоставляет обширный набор функций для измерения геометрических параметров объектов, количественного анализа цвета, текстурного и фрактального анализа изображений.

Выбор *ImageJ* в качестве основного инструмента анализа хроматограмм обусловлен рядом преимуществ: свободное распространение и открытый исходный код; обширная пользовательская база и развитая экосистема расширений; поддержка работы с изображениями в различных форматах; возможность автоматизации повторяющихся операций с помощью макросов и скриптов; кроссплатформенность (*Windows, macOS, Linux*).

Измерение геометрических параметров зон хроматограммы. Для измерения размеров зон на хроматограмме программа *ImageJ* предлагает несколько инструментов. Основным из них является функция измерения области (*Analyze → Measure*), которая позволяет автоматически определять площадь выделенной пользователем области или автоматически выделять области на основе пороговых значений интенсивности.

После калибровки масштаба изображения программа автоматически пересчитывает пиксельные измерения в метрические единицы. Функция *Measure* позволяет определять размерные характеристики (площадь, периметр, средний диаметр, минимальный и максимальный диаметры Ферет и др.) а также характеристики формы (круглость, округлость, сплошность, компактность и др.) (рисунок 1). Эти данные экспортируются в формате, пригодном для последующей статистической обработки в табличных процессорах или специализированных программах.

Results													
File Edit Font Results													
Label	Area	Mean	XM	YM	Circ	Feret	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret	AR	Round	Solidity
1 Диф_Зона_250ч_32 мм.tif	439.175	98.492	15.872	16.294	1.000	24.119	15.881	28.418	90	23.164	1.040	0.961	0.999

Рисунок 1 – Окно результатов определения геометрических характеристик с использованием функции *Measure*

Точность измерений ограничена разрешением исходного изображения. Для большинства современных сканеров и цифровых камер разрешение составляет единицы микрометров на пиксель, что обеспечивает погрешность измерений менее 1 %. Это существенно превосходит точность визуальной оценки.

Для анализа хроматограмм масляного пятна особый интерес представляет возможность измерения отношения диаметров ядра и зоны диффузии, которое служит индикатором диспергирующих свойств масла [1]. Программа позволяет автоматически выделять эти зоны на основе пороговой обработки и рассчитывать искомое отношение для каждой хроматограммы.

Количественная оценка окраски зон хроматограммы. Для измерения окраски зон хроматограммы в *ImageJ* используются инструменты анализа гистограммы и измерения значений пикселей. Функция *Analyze* → *Color Histogram* отображает распределение значений интенсивности выделенной области в пространстве *RGB* (красный – зеленый – синий), позволяя количественно оценить степень однородности окраски и выявить наличие градиентов (рисунок 2).

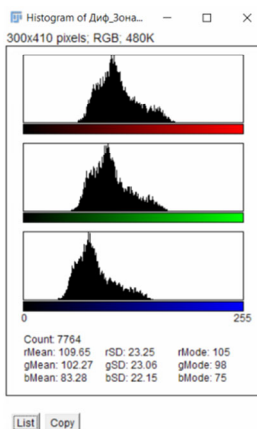


Рисунок 2 – Окно результатов оценки окраски с использованием функции *Color Histogram*

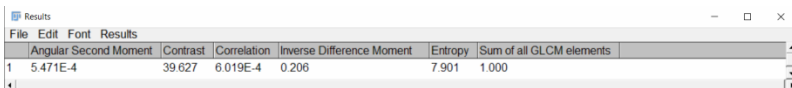
Измерение средней интенсивности в выделенной области дает числовой показатель, пропорциональный концентрации вещества в данной зоне хроматограммы. Для повышения информативности анализа используются дополнительные статистические характеристики: медиана, мода, стандартное отклонение, коэффициент вариации.

Программа поддерживает работу с изображениями в различных цветовых пространствах: *RGB*, *Grayscale* (оттенки серого), *HSB* (оттенок – насыщенность – яркость) и *CIELAB*. Для анализа хроматограмм желто-коричневых оттенков пространство *CIELAB* может быть предпочтительнее *RGB*, поскольку оно обеспечивает более равномерное восприятие различий в цвете человеческим глазом.

Текстурный анализ хроматограмм. Текстурный анализ хроматограмм представляет собой метод оценки структурных особенностей поверхности масляного пятна, основанный на выявлении и количественном описании закономерностей распределения оптических характеристик по площади хроматограммы. Текстура хроматограммы отражает микрогеометрию поверхности масляного пятна и содержит информацию о процессах, протекавших при формировании хроматографического рисунка.

Классическим инструментом текстурного анализа являются матрицы *GLCM* (*Gray Level Co-occurrence Matrix*) [7]. Матрица *GLCM* описывает вероятность совместного появления пар пикселей с определенными значениями интенсивности на заданном расстоянии и в заданном направлении. На основе *GLCM* вычисляются ряд текстурных параметров: контраст, корреляция, однородность, энергия, энтропия и др.

В программе *ImageJ* матрица *GLCM* и связанные с ней текстурные параметры вычисляются с помощью плагина *GLCM Texture*. Плагин вычисляет 8 текстурных параметров: угловой второй момент (*Angular Second Moment*), контраст, корреляцию, сумму квадратов дисперсии, инерцию (*Inverse Difference Moment*), сумму средних, сумму дисперсии и сумму энтропии (рисунок 3).



The screenshot shows a window titled 'Results' with a menu bar (File, Edit, Font, Results). Below the menu is a table with 8 columns: Angular Second Moment, Contrast, Correlation, Inverse Difference Moment, Entropy, Sum of all GLCM elements, and two empty columns. The first row of data contains the following values: 5.471E-4, 39.627, 6.019E-4, 0.206, 7.901, 1.000, and two empty cells.

	Angular Second Moment	Contrast	Correlation	Inverse Difference Moment	Entropy	Sum of all GLCM elements		
1	5.471E-4	39.627	6.019E-4	0.206	7.901	1.000		

Рисунок 3 – Окно результатов текстурного анализа с использованием плагина *GLCM Texture*

Фрактальный анализ изображений. Фрактальный анализ представляет собой математический подход к описанию объектов и явлений, характеризующихся самоподобной структурой на различных масштабах [8]. Фрактальные свойства объектов описываются фрактальной размерностью – числом, которое количественно характеризует степень заполнения пространства объектом и его сложность.

Применительно к хроматограммам моторных масел фрактальный анализ позволяет охарактеризовать геометрическую сложность границ зон разделения и текстуру поверхности масляного пятна. Фрактальная размерность границы зоны хроматограммы отражает степень нерегулярности этой границы и может служить индикатором процессов, протекавших при формировании зоны.

В *ImageJ* фрактальный анализ реализован с помощью плагина *FracLac* [9]. Плагин позволяет вычислять фрактальную размерность методом подсчета ячеек (*box counting*), а также анализировать лакунарность и мультифрактальные характеристики изображений. Метод *box counting* заключается в последовательном покрытии изображения сеткой квадратов различного размера и подсчете числа квадратов, содержащих часть анализируемого объекта. Зависимость числа заполненных квадратов от размера квадрата в логарифмических координатах представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой равен фрактальной размерности.

Кроме того, в *ImageJ* доступна встроенная функция *Fractal Box Count* (*Analyze* → *Tools* → *Fractal Box Count*), которая требует бинарного изображения и вычисляет фрактальную размерность выделенных объектов. Для анализа хроматограмм границы зон могут быть выделены с помощью пороговой обработки, а затем проанализированы на предмет фрактальной размерности.

На основе проведенного анализа ограничений визуальной оценки и возможностей инструментов компьютерного зрения становится очевидным, что традиционный подход к интерпретации хроматограмм масляного пятна требует существенного пересмотра. Комплексный подход к анализу хроматограмм с использованием *ImageJ* предполагает одновременное использование нескольких методов: измерения геометрических параметров зон, количественной оценки окраски, текстурного анализа и фрактального анализа.

Комбинация этих методов позволяет получить многопараметрическую характеристику хроматограммы, которая может служить основой для разработки математических моделей оценки состояния моторного масла. Каждый из методов вносит свой вклад в общую информативность анализа: геометрические параметры отражают масштабные характеристики зон, цветовые характеристики – химический состав, текстурные параметры – структурные особенности, фрактальные характеристики – сложность и нерегулярность.

Применение компьютерного зрения для анализа хроматограмм обеспечивает ряд существенных преимуществ перед традиционными методами. Цифровое представление хроматограммы позволяет сохранять результаты измерений в стандартизированной форме, пригодной для долговременного хранения, сравнения и статистического анализа. Автоматизация процедуры измерений снижает трудозатраты и исключает влияние субъективных факторов. Возможность обработки больших массивов данных позволяет накапливать базу измерений для разработки и валидации статистических моделей оценки состояния масел.

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