

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПРЕСС-ТЕСТИРОВАНИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *IMAGEJ*.

ЧАСТЬ 7. ЦИФРОВИЗАЦИЯ БАЛЛЬНЫХ ШКАЛ *MOTORCHECKUP* ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МОТОРНОГО МАСЛА ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.К. Корнеева,

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

В.М. Капцевич,

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

В статье решена задача цифровизации балльных шкал MOTORcheckUP, используемых при экспресс-диагностике состояния моторного масла дизельных двигателей методом капельной пробы. Для повышения объективности оценки хроматограмм масляных пятен предложен подход, основанный на цифровом анализе изображений шкал и хроматограмм. С использованием программного комплекса ImageJ и плагина Color Inspector 3D определены цветовые координаты балльных шкал ядра и диффузионной зоны в цветовом пространстве RGB и сформированы их цифровые аналоги. На основе полученных данных установлены функциональные зависимости между интенсивностью окрашивания зон хроматограммы и соответствующей балльной оценкой. Для автоматизации обработки разработан макрос OilSpotAnalyzer в среде ImageJ, позволяющий автоматически определять радиус ядра, среднюю интенсивность окрашивания зон и соответствующие балльные показатели. Апробация метода на хроматограммах моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой подтвердила возможность объективной количественной оценки состояния масла и повышения воспроизводимости экспресс-диагностики.

Ключевые слова: моторное масло, дизельный двигатель, капельная проба, хроматограмма, балльная оценка, цифровизация, ImageJ, макрос OilSpotAnalyzer, компьютерное зрение, экспресс-диагностика, MOTORcheckUP.

The problem of digitalizing the MOTORcheckUP rating scales used for express diagnostics of diesel engine oil condition using the Blotter Spot method is solved in the article. To improve the objectivity of oil slick chromatogram evaluation, an approach based on digital analysis of scale images and chromatograms is proposed. Using ImageJ software and the Color Inspector 3D plugin, the color coordinates of the core and diffusion zone rating scales in the RGB color space were determined and their digital counterparts were generated. Based on the obtained data, functional relationships were established between the color intensity of chromatogram zones and the corresponding rating. To automate the processing, the OilSpotAnalyzer macro was developed in ImageJ, allowing automatic determination of the core radius, average zone color intensity, and corresponding ratings. Testing the method on chromatograms of Lukoil Avangard 10W40 engine oil with varying mileage confirmed the feasibility of an objective quantitative assessment of oil condition and improved reproducibility of express diagnostics.

Keywords: motor oil, diesel engine, Blotter Spot method, chromatogram, scoring, digitalization, ImageJ, OilSpotAnalyzer macro, computer vision, express diagnostics, MOTORcheckUP.

Введение

В условиях интенсивной эксплуатации дизельных двигателей внутреннего сгорания своевременная диагностика состояния моторного масла имеет важное значение для обеспечения надежности работы двига-

теля, снижения износа его деталей и предупреждения отказов. В процессе эксплуатации в моторном масле накапливаются продукты неполного сгорания топлива, частицы износа деталей, пыль, вода и продукты окисления, что приводит к ухудшению его смазывающих,

моюще-диспергирующих и защитных свойств [1]. Несвоевременное выявление изменений в составе и свойствах масла может привести к ускоренному износу цилиндро-поршневой группы, повышению расхода топлива и снижению ресурса двигателя.

Для оценки состояния моторных масел широко применяются лабораторные методы анализа, такие как спектрометрический анализ продуктов износа, определение вязкости, кислотного и щелочного числа, а также анализ содержания воды и топлива в масле. Однако данные методы требуют специализированного оборудования, значительных временных и материальных затрат и, как правило, выполняются в лабораторных условиях, что ограничивает возможность их применения для оперативной диагностики техники непосредственно в процессе эксплуатации [2].

В связи с этим широкое распространение получили методы экспресс-диагностики состояния масла, одним из которых является метод «капельной пробы» [3-5]. Несмотря на простоту и доступность, основным недостатком данного метода является субъективность визуальной оценки результатов, зависящая от опыта и квалификации оператора, условий освещения и качества изображения хроматограммы. Это может приводить к значительным расхождениям в результатах диагностики и снижению достоверности оценки технического состояния двигателя.

Одним из перспективных направлений повышения объективности и воспроизводимости экспресс-диагностики является использование методов цифровой обработки изображений и компьютерного зрения, применяемых при решении различного вида технических задач. Так, ранее в работах [6, 7] авторами предложены различные варианты цифровой обработки хроматограмм для анализа состояния моторного масла с использованием программного комплекса *ImageJ* [8]:

- метод «свечения границ» (*Glow Edges*);
- метод трехмерной визуализации поверхности (*Interactive 3D Surface Plot*);
- метод диаметальной денситометрии (*Diametral Densitometry Method*);
- бесприборный метод оценки свойств моторного масла согласно *ASTM D 7899*.

Данные методы позволяют перейти от субъективной визуальной интерпретации к количественной оценке цветовых и структурных характеристик хроматограмм масляных пятен, что открывает возможности для автоматизации процесса диагностики и интеграции его в системы мониторинга технического состояния машин.

В то же время в последние годы широкое распространение получил метод «капельной пробы», предложенный Г. Хортсмейером [4] и реализованный в системе *MOTORcheckUP* [5]. Метод основан на визуальной оцен-

ке интенсивности окрашивания кольцевых зон масляного пятна по девятибалльным шкалам. Шкала ядра отражает содержание твердых загрязнений, а диффузионная зона – диспергирующую способность моторного масла.

Целью настоящей работы является цифровизация балльных шкал *MOTORcheckUP* и разработка метода автоматизированной балльной оценки состояния моторного масла дизельных двигателей по интенсивности окрашивания кольцевых зон хроматограммы масляного пятна.

Методика исследования

Цифровизацию балльных шкал *MOTORcheckUP* и анализ хроматограмм масляных пятен выполняли с использованием программного комплекса *ImageJ*. Определение цветовых координат изображений шкал проводили с помощью плагина *Color Inspector 3D* в цветовом пространстве *RGB*. Для анализа хроматограмм моторного масла применяли плагин *Radial Profile*, позволяющий получать радиальное распределение интенсивности окрашивания масляного пятна. Полученные табличные значения радиуса и интенсивности окрашивания обрабатывались с использованием разработанного макроса *OilSpotAnalyzer* в среде *ImageJ*, который автоматически определял радиус ядра, среднюю интенсивность окрашивания ядра и диффузионной зоны, а также соответствующие балльные оценки.

Основная часть

Для установления цветовых координат балльных шкал ядра и диффузионной зоны воспользуемся данными справочного руководства *MOTORcheckUP* [5], в котором представлены их изображения (рис. 1) и карта оперативной диагностики дизельного двигателя (табл. 1).

Определение цветовых координат балльных шкал осуществляли с использованием программного комплекса *ImageJ* и его плагина *Color Inspector 3D* [9-11]. Процесс цифровизации изображений балльных шкал проводили по следующей схеме. Изображения балльных шкал *MOTORcheckUP* (рис. 1) открывали в программе *ImageJ* и проводили их корректировку для удаления шума применением фильтра *Median* с радиусом *radius = 5 pixel*. Изображения шкал, подготовленных к цифровизации, представлены на рисунке 2.

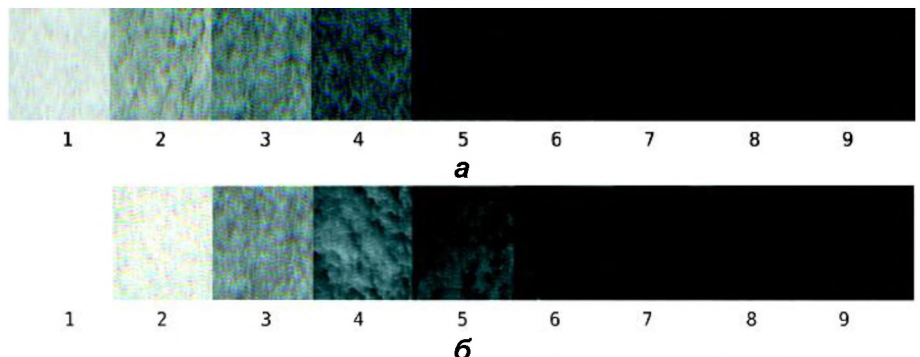


Рисунок 1. Изображения балльных шкал *MOTORcheckUP*: а – ядра; б – диффузионной зоны [5]

Таблица 1. Карта оперативной диагностики дизельного двигателя [5]

Балл	Состояние моторного масла	Рекомендации по эксплуатации ДВС
<i>Ядро</i>		
1...3	Сажа, частицы металла, пыль и грязь не содержатся или содержатся в очень малом количестве	Можно продолжать эксплуатацию двигателя. Рекомендуется повторно воспользоваться экспресс-тестом после 4000...5000 км пробега
4...6	Обнаружено повышенное содержание сажи, частиц металла, пыли и грязи. Возможны неполадки двигателя	Допустимо продолжение эксплуатации двигателя; рекомендуется в ближайшее время посетить специализированный автосервис для проведения подробной диагностики двигателя
7...9	Высокое содержание механических примесей. Причины: неполное сгорание топлива, неисправности систем питания и зажигания, загрязнение магистральных фильтров, дефекты выхлопной системы	Дальнейшая эксплуатация не рекомендуется. Возможны: нарастание сажи и нагара на клапанах и поршнях, ухудшение теплообмена, повышенный износ, повышение расхода топлива, ухудшение компрессии. Рекомендуется немедленно обратиться в автосервис для диагностики и ремонта
<i>Диффузионная зона</i>		
1...3	Масло находится в хорошем состоянии. Степень старения и окисления масла невелика	Можно продолжать эксплуатацию двигателя. Рекомендуется повторно воспользоваться Экспресс-тестом после 4000...5000 км пробега
4...6	Обнаружены первые признаки старения масла. Причины: использование некачественного топлива	Допустимо продолжение эксплуатации двигателя. Появление признаков старения масла в течение 6 000...7 000 км пробега указывает на возможность наличия дефектов
7...9	Высокая степень старения и окисления масла. Причины: слишком большой пробег или слишком редкая смена масла, перегрев двигателя, неверный выбор марки и типа масла, высокое содержание серы в топливе	Дальнейшая эксплуатация не рекомендуется. Возможны: повышенный износ поршневой группы и других деталей, повышение расхода топлива, падение мощности. Необходимы замена масла и повторный экспресс-тест после 1000 км пробега

Для непосредственного определения цветовых координат использовали плагин «Color Inspector 3D». Этот плагин позволяет визуализировать цифровое изображение в 14 различных трехмерных цветовых пространствах, определять цветовые координаты для каждого из них, представлять модели в различных видах отображения, ограничивать количество цветов и др.

На рисунке 3 представлены интерфейсы результатов представления шкал MOTORcheckUP в плагине Color Inspector 3D в цветовом пространстве RGB с выбором количества цветов (Color), соответствующего количеству баллов и равного 9. При нажатии кнопки «LUT» плагин выдает значения цветовых координат в отдельном одноименном окне.

Полученные при помощи плагина Color Inspector 3D значения цветовых координат в пространстве RGB для шкал ядра и диффузионной зоны представлены в таблице 2.

По данным таблицы 2 были получены цифровые изображения шкал ядра и диффузионной зоны, представленные на рисунке 4.

Для установления функциональных зависимостей балльных оценок шкал ядра и зоны диффузии от интенсивностей окрашивания этих зон использовали методику, описанную в работе [12]. Полученные функциональные зависимости имеют вид:

– для ядра

$$B_{\text{я}} = 9,05 - 0,04I_{\text{я}}; \quad (1)$$

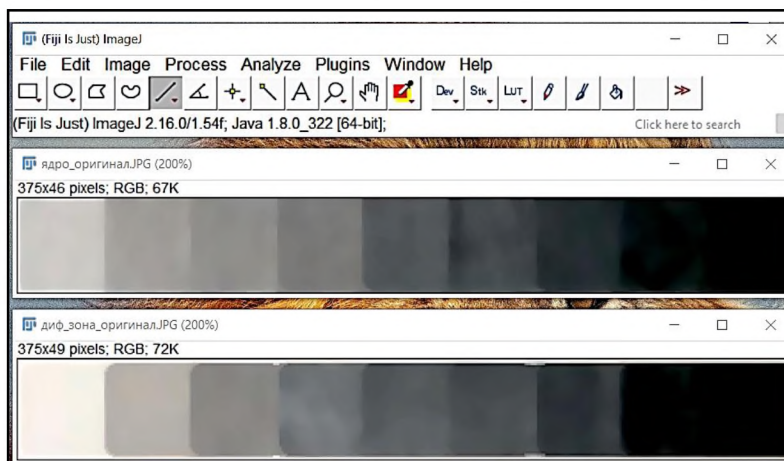


Рисунок 2. Изображения балльных шкал MOTORcheckUP ядра и диффузионной зоны после предварительной обработки фильтром Median

– для диффузионной зоны

$$B_{\text{диф.з}} = 9,37 - 0,06I_{\text{диф.з}} + (8,47 \cdot 10^{-5})I_{\text{диф.з}}^2, \quad (2)$$

где $B_{\text{я}}$ и $B_{\text{диф.з}}$ – значения интенсивности окрашивания в баллах ядра и диффузионной зоны, соответственно;

$I_{\text{я}}$ и $I_{\text{диф.з}}$ – средние значения интенсивности окрашивания ядра и диффузионной зоны, соответственно.

Графические представления зависимостей балльных оценок шкал ядра и зоны диффузии приведены на рисунке 5.

В качестве объекта исследований выбраны цифровые изображения хроматограмм моторных масел марки Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 0; 33; 88; 135; 185 и 250 ч (рис. 1) [6].

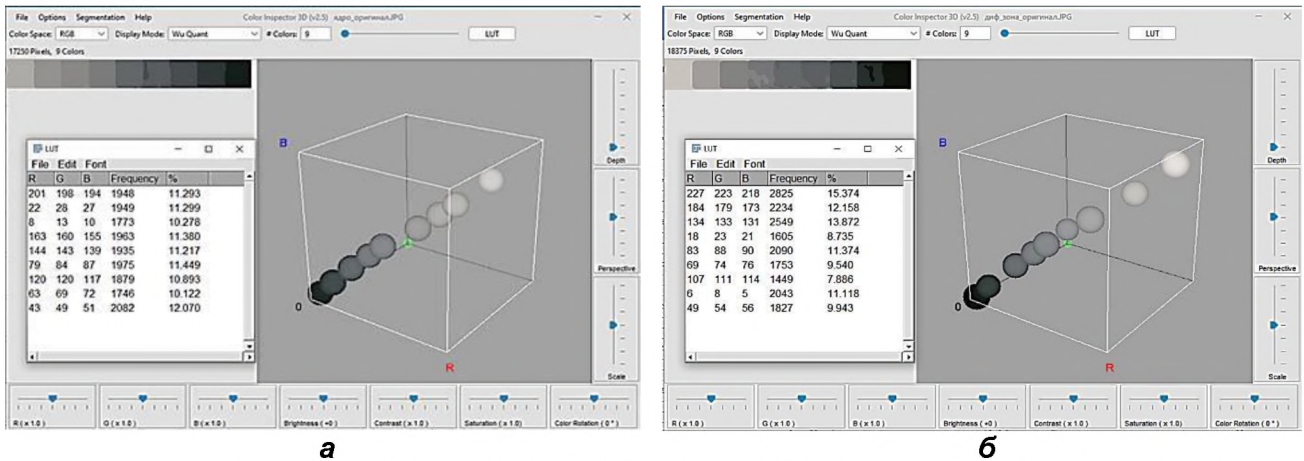


Рисунок 3. Определение цветовых координат балльных шкал MOTORcheckUP в плагине Color Inspector 3D в цветовом пространстве RGB: а – шкала ядра; б – шкала диффузионной зоны

Таблица 2. Значения цветовых координат в пространстве RGB для шкал ядра и диффузионной зоны

Балл	Ядро			Диффузионная зона		
	R (красный)	G (зеленый)	B (синий)	R (красный)	G (зеленый)	B (синий)
1	201	198	194	227	223	218
2	163	160	155	184	179	173
3	144	143	139	134	133	131
4	120	120	117	107	111	114
5	79	84	87	83	88	90
6	63	69	72	69	74	76
7	43	49	51	49	54	56
8	22	28	27	18	23	21
9	8	13	10	6	8	5

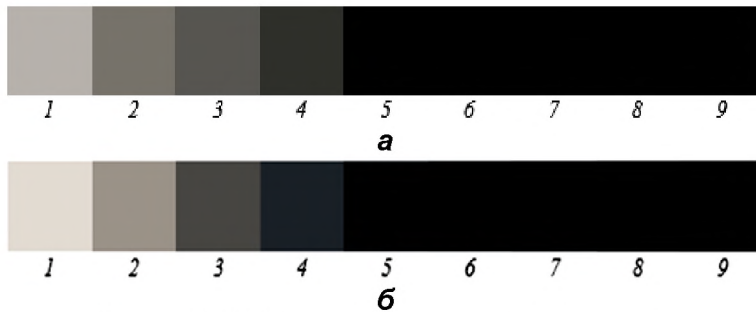


Рисунок 4. Цифровые изображения балльных шкал MOTORcheckUP, сформированные на основе полученных цветовых координат: а – шкала ядра; б – шкала диффузионной зоны

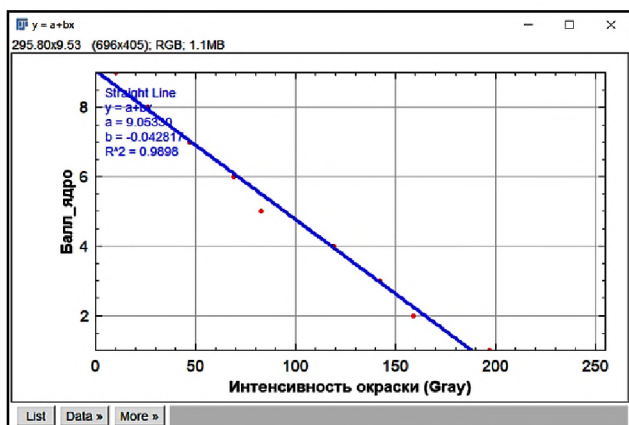
Для установления балльной оценки ядра и диффузионной зоны рассматриваемых масел был разработан макрос *OilSpotAnalyzer* в среде *ImageJ* (рис. 6), позволяющий автоматически определять эти значения, используя табличные данные, полученные с помощью плагина *Radial Profile* [7]. Макрос позволяет автоматически определять минимальное значение интенсивности окрашивания и соответствующее ему значение радиуса, который является радиусом ядра $r_{я}$, а затем в диапазоне $0...r_{я}$ находить среднее значение интенсивности окрашивания $I_{д}$ и по функциональной зависимости (1) рассчитывать соответствующее значения этой

интенсивности в баллах $B_{д}$. Аналогичным образом в диапазоне $r_{я}...r_{диф.з}$ ($r_{диф.з}$ – радиус окружности, соответствующий радиусу наружной границе диффузионной зоны) определяется среднее значение интенсивности окрашивания $I_{диф.з}$ и по функциональной зависимости (2) рассчитываются значения интенсивности ее окрашивания в баллах $B_{диф.з}$. Также макрос позволяет определять среднее значение $B_{ср}$ ядра и диффузионной зоны в баллах.

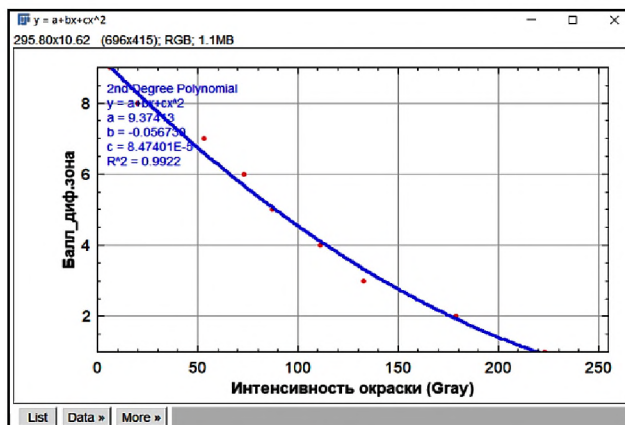
Разработанный программный алгоритм обеспечивает полную автоматизацию процедуры балльной оценки хроматограммы и исключает влияние субъективного фактора оператора при интерпретации результатов диагностики.

В качестве примера на рисунке 7 представлен результат автоматизированной балльной оценки с использованием составленного макроса для моторного масла с наработкой 0 ч (свежее масло).

Для рассматриваемых хроматограмм моторных масел в таблице 3 представлены автоматически определенные размеры ядра и диффузионной зоны, соответствующие им значения интенсивности окрашивания и ее балльная оценка.



а



б

Рисунок 5. Графические зависимости балльных оценок шкал MOTORcheckUP от интенсивностей окрашивания зон хроматограммы: а – шкала ядра; б – шкала диффузионной зоны

```

1 // Извлечь макрос для балльной оценки ядра и диффузионной зоны масла
2 // Диффузионная зона: от границы ядра до максимального радиуса в таблице
3
4 // Функция для получения минимальной интенсивности и её радиуса
5 function getMinIntensityAndRadius(intensities, radii) {
6     minIntensity = intensities[0];
7     minRadius = radii[0];
8     for (i = 0; i < intensities.length; i++) {
9         if (intensities[i] < minIntensity) {
10            minIntensity = intensities[i];
11            minRadius = radii[i];
12        }
13    }
14    resultArray = newArray(2);
15    resultArray[0] = minIntensity;
16    resultArray[1] = minRadius;
17    return resultArray;
18 }
19
20 // Функция для получения максимального радиуса
21 function getMaxRadius(radii) {
22     maxRadius = radii[0];
23     for (i = 1; i < radii.length; i++) {
24         if (radii[i] > maxRadius) {
25             maxRadius = radii[i];
26         }
27     }
28     return maxRadius;
29 }
30
31 // Функция для вычисления среднего значения в диапазоне
32 function getAverageInRange(intensities, radii, r_start, r_end) {
33     sum = 0;
34     count = 0;
35     for (i = 0; i < intensities.length; i++) {
36         if (radii[i] >= r_start && radii[i] <= r_end) {

```

Рисунок 6. Фрагмент программного кода макроса OilSpotAnalyzer в среде ImageJ для автоматизированного определения балльной оценки ядра и диффузионной зоны хроматограммы масляного пятна

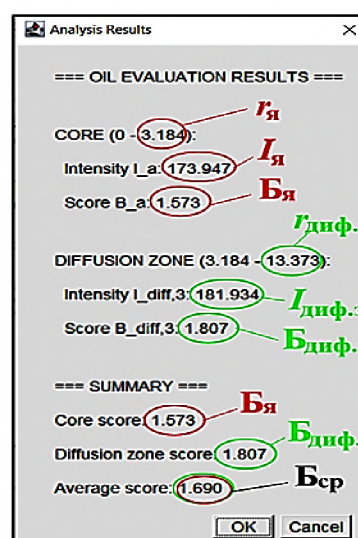


Рисунок 7. Результат автоматизированной балльной оценки хроматограммы свежего моторного масла (наработка 0 ч) с использованием разработанного макроса OilSpotAnalyzer

Для оценки работоспособности разработанного алгоритма автоматизированной балльной оценки были обработаны цифровые изображения хроматограмм моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой. Для каждой хроматограммы с использованием разработанного макроса OilSpotAnalyzer были автоматически определены радиус ядра и радиус диффузионной зоны, рассчитаны средние значения интенсивности их окрашивания, а также соответствующие балльные оценки в соответствии с полученными ранее функциональными зависимостями. Результаты автоматизированной обработки изображений хроматограмм и соответствующие диагностические показатели представлены в таблице 3.

Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает закономерное изменение диагностических параметров хроматограммы масляного пятна по мере

увеличения наработки двигателя. Так, с ростом времени эксплуатации моторного масла наблюдается устойчивое увеличение балльной оценки ядра хроматограммы с 1,6 до 5,9 балла. Данная тенденция обусловлена накоплением в масле твердых загрязнений, включая частицы износа деталей цилиндро-поршневой группы, продукты неполного сгорания топлива и сажевые образования. Увеличение концентрации этих частиц приводит к усилению окрашивания центральной зоны хроматограммы и, как следствие, к росту ее балльной оценки.

Одновременно наблюдается постепенное увеличение балльной оценки диффузионной зоны с 1,8 до 4,5 балла, что свидетельствует о снижении диспергирующей способности масла. Это связано с деградацией мощно-диспергирующих присадок и накоплением продуктов окисления и термического разложения

Таблица 3. Автоматически определенные размеры ядра и диффузионной зоны и их балльная оценка

Наработка, ч	Ядро			Диффузионная зона		
	Радиус, мм	Интенсивность окрашивания	Балл	Радиус, мм	Интенсивность окрашивания	Балл
0	3,2	173,9	1,6	13,4	182,0	1,8
33	3,9	123,3	3,8	10,3	138,8	3,1
88	3,9	84,8	5,4	12,1	117,1	3,9
135	4,3	81,2	5,6	11,5	109,3	4,2
185	4,5	77,5	5,7	11,9	102,3	4,4
250	3,9	74,0	5,9	12,1	101,2	4,5

масла, которые ухудшают способность масла удерживать твердые загрязнения во взвешенном состоянии. В результате происходит изменение структуры диффузионной зоны хроматограммы и увеличение интенсивности ее окрашивания.

Следует отметить, что на протяжении первых этапов эксплуатации (до 88-135 ч наработки) изменение диагностических показателей происходит относительно плавно и соответствует нормальному процессу эксплуатационного старения масла. Однако при дальнейшем увеличении наработки до 185-250 ч наблюдается приближение балльных оценок к границе диагностически допустимых значений, что свидетельствует о существенном накоплении продуктов износа и деградации эксплуатационных свойств масла. Полученные результаты согласуются с известными закономерностями изменения состава и свойств моторных масел в процессе эксплуатации и подтверждают диагностическую информативность предложенного метода цифровой обработки хроматограмм масляных пятен.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют высокую чувствительность предложенного алгоритма к изменениям состояния моторного масла и подтверждают возможность использования цифровой обработки изображений хроматограмм для объективной и воспроизводимой экспресс-диагностики дизельных двигателей.

Заключение

В результате выполненных исследований разработан метод цифровизации балльных шкал *MOTORcheckUP*, применяемых для экспресс-диагностики состояния моторного масла дизельных двигателей методом капельной пробы. С использованием программного комплекса *ImageJ* и плагина *Color Inspector 3D* определены цветовые координаты шкал ядра и диффузионной зоны в цветовом пространстве *RGB* и сформированы их цифровые изображения, соответствующие девятибалльной системе оценки.

На основе анализа цветовых характеристик получены функциональные зависимости, связывающие интенсивность окрашивания зон хроматограммы масляного пятна с балльной оценкой состояния масла. Для автоматизации диагностической процедуры разработан макрос *OilSpotAnalyzer* в среде *ImageJ*, позволяющий по данным радиального профиля автоматически определять радиус ядра, интенсивность окрашивания кольцевых зон и соответствующие балльные показатели ядра и диффузионной зоны.

Апробация предложенного алгоритма на цифровых изображениях хроматограмм моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой показала закономерное увеличение балльных оценок по мере накопления продуктов износа, сажи и продуктов окисления в масле. Полученные результаты свидетельствуют о возможности объективной количественной интерпретации хроматограмм масляных пятен и перехода от субъективной визуальной оценки к автоматизированной компьютерной диагностике.

Научная новизна работы заключается в разработке метода цифрового представления балльных шкал *MOTORcheckUP* и установлении аналитических зависимостей между интенсивностью окрашивания зон хроматограммы и их балльной оценкой. Практическая значимость состоит в возможности автоматизации экспресс-диагностики состояния моторного масла и использовании разработанного алгоритма в системах мониторинга технического состояния автотракторной техники на предприятиях агропромышленного комплекса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – Москва: Химия, 1979. – 240 с.
2. 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.
3. 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.
4. Патент RU 2 649 095/ Способ и устройство для анализа масел и технических рабочих жидкостей и для квалифицированной оценки рабочих состояний элементов / Г. Хорстмейер. – Опубл. 29.03.2018.
5. Экспресс-тесты *MOTORcheckUP* и *FLUIDcheckUP*: справочн. руководство. – URL: <https://www.alkom.su/files/pdf/motorcheckup2.pdf> (дата обращения: 24.02.2026).
6. Корнеева, В.К. Методы оценки экспериментальных результатов экспресс-тестирования моторных масел, основанные на использовании программного комплекса *ImageJ*. Часть 5. Цифровая обработка