УДК 621.432/004.932
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-172-6-20-27

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

**В.М. Капцевич,**
*зав. каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор*

***Предложен комплекс из трех оригинальных методов цифровой обработки хроматограмм моторных масел с использованием программного комплекса ImageJ: метод «свечения границ» (Glow Edges), метод трехмерной визуализации поверхности (Interactive 3D Surface Plot) и метод диаметральной денситометрии (Diametral Densitometry Method). Методы апробированы на моторном масле Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 0-250 ч. Установлены три стадии деградации: накопление сажи при сохраненной диспергирующей способности (0-80 ч), прогрессирующая коагуляция сажи (80-135 ч) и полная утрата зональной структуры вследствие автокаталитического окисления (после 135 ч). Разработанный комплекс обеспечивает экспресс-оценку состояния масла в полевых условиях с высокой воспроизводимостью и не требует дорогостоящего оборудования.***

***Ключевые слова: моторное масло, капельная проба, ImageJ, цифровая обработка изображений, экспресс-диагностика, «свечение границ», трехмерная визуализация, диаметральная денситометрия, деградация масла, автокаталитическое окисление.***

***A set of three original methods for digital processing of motor oil chromatograms using the ImageJ software package has been proposed: the Glow Edge method, the Interactive 3D Surface Plot method, and the Diametral Densitometry Method. The methods were tested on Lukoil Avangard 10W40 motor oil with an operating time of 0-250 hours. Three stages of degradation were identified: soot accumulation with preserved dispersing ability (0-80 hours), progressive soot coagulation (80-135 hours), and complete loss of zonal structure due to autocatalytic oxidation (after 135 hours). The developed complex provides rapid assessment of oil quality in field conditions with high reproducibility and does not require expensive equipment.***

***Keywords: motor oil, Blotter spot, ImageJ, digital image processing, express diagnostics, boundary glow, 3D visualization, diametrical densitometry, oil degradation, autocatalytic oxidation.***

## Введение

Одной из основных задач технической эксплуатации ДВС является своевременное определение момента необходимости замены моторного масла. Традиционные лабораторные методы (определение кислотного и щелочного чисел, ИК-спектроскопия, содержание нерастворимых веществ) точны, но требуют дорогостоящего оборудования и значительного времени.

Одним из наиболее распространенных и простых методов оценки состояния работающего моторного масла является метод «капельной пробы» – метод *Blotter Spot*, заключающийся в нанесении капли масла на фильтровальную бумагу и последующем анализе полученного масляного пятна. Этот метод позволяет на бумажной хроматограмме выделить кольцевые зоны и по их размерам и окраске оценить диспергирующие свойства и загрязненность моторного масла, что в конечном итоге дает возможность сделать заключение о целесообразности дальнейшего его использования [1].

Главным ограничением классического визуального анализа хроматограмм является субъективность оценки. Так, в работе [2] о работоспособности моторного масла и возможности его дальнейшего использования судят по определяемым визуально размерам ядра и диффузионной зоны на хроматограмме и их соотношению, а в работе [3] качество моторного масла определяют по окраске кольцевых зон на хроматограмме, сравнивая их с эталонными шкалами. Однако приведенные методы

являются органолептическими, основанными на визуальной оценке, зависящей от индивидуального восприятия и опыта оператора, что приводит к неточным, а иногда и ошибочным, результатам.

Известен способ [4], обеспечивающий автоматическую оценку диспергирующих свойств и загрязненности моторного масла при помощи специализированного прибора DT100 с установленным в нем программным обеспечением. Однако высокая стоимость оборудования для реализации способа и закрытость программного обеспечения приводят к невозможности его использования в условиях предприятий АПК.

В работе [5] обоснован новый подход к анализу результатов экспресс-тестирования моторных масел с использованием программного комплекса *ImageJ* [6]. Этот программный комплекс, находящийся в открытом доступе и не требующий использования специализированного оборудования, обладает широкой возможностью использования различных встроенных инструментов и более тысячи плагинов для получения количественной объективной оценки изображений, в первую очередь, в медицине и биологии.

При анализе хроматограмм с использованием программного комплекса *ImageJ* необходимо выбрать такие инструменты и плагины, которые позволят, во-первых, получать четкие границы кольцевых зон, во-вторых, оценивать их размеры и в-третьих, определять интенсивность окраски каждой зоны. Так, для выделения границ может быть применен встроенный инструмент *Find Edges*, который, например, использовался в методе обнаружения границ для количественной оценки миграции клеток [7], а также для быстрой обработки микроскопических изображений эритроцитов, зараженных малярией [8]. Для оценки размеров и интенсивности окрашивания в программе *ImageJ* может быть использован плагин *Interactive 3D Surface Plot,* который применялся, например, для визуализации шероховатости титановых дисков в имплантологической стоматологии [9] и при оценке роста слоев сталагмитов в геологии [10]. Для получения количественных значений окрашивания и размеров кольцевых зон может быть предложен встроенный инструмент *Plot Profile*, используемый в медицине, например, для построения графиков интенсивности флуоресценции вдоль прямой линии, проходящей через клеточную структуру [11].

Целью работы является разработка методов цифровой обработки хроматограмм моторного масла с использованием возможностей программного комплекса *ImageJ*.

## Основная часть

Для количественной оценки масляных пятен на хроматограммах моторного масла авторами предложены три оригинальных метода цифровой обработки: метод «свечения границ» (*Glow Edges*), метод трехмерной визуализации поверхности (*Interactive 3D Surface Plot*) и метод диаметральной денситометрии (*Diametral Densitometry Method*).

В качестве объектов исследования выбраны цифровые изображения хроматограмм моторного масла марки Лукойл Авангард *SAE* 10*W*40 (*API CF*) с наработкой – 0, 33; 88; 135; 185 и 250 ч.

Предварительным этапом для осуществления предлагаемых трех методов является подготовка изображений, включающая введение их в программу *ImageJ*, последующее масштабирование и выделение области интереса. На рисунке 1 представлены масштабированные цифровые изображения хроматограмм с выделенной областью интереса размером 32×32 мм.

**Метод «свечения границ» (*Glow Edges*).** Данный метод заключается в получении четкого изображения границ кольцевых зон и последовательном измерении их размеров. Для получения четкого изображения границ кольцевых зон производим их выделение (*Find Edges*), размываем границы, создавая эффект свечения с использованием фильтра *Gaussian Blur* и настраиваем яркость изображения (*Brightness/Contrast*). В результате границы всех кольцевых зон (ядра, диффузионной зоны, зоны чистого масла) приобретают ярко выраженный светящийся контур на черном фоне, что позволяет с высокой точностью и воспроизводимостью выполнять измерения диаметров и площадей даже при неравномерном освещении и слабом контрасте исходного пятна. Изображения хроматограмм с выделенными границами кольцевых зон, готовые для определения размеров, представлены на рисунке 2.

Анализируя изображения хроматограмм (рис. 2) с увеличением наработки моторного масла Лукойл Авангард 10*W*40 от 0 до 250 ч, можно отметить следующие закономерности: для чистого масла (0 ч) – пятно практически однородное, ядро отсутствует, граница между зоной чистого масла и диффузионной зоной размыта; для масел с наработкой 33-135 ч – проявляются четко выраженные границы ядра, диффузионной зоны и зоны чистого масла, при этом с ростом наработки зона ядра увеличивается, а зона чистого масла значительно уменьшается; для масел с наработкой 185-250 ч – наблюдается резкий рост зоны ядра и уменьшение зон диффузии и чистого масла, причем размытие границы зоны диффузии может свидетельствовать о потере диспергирующих свойств.

Для определения размеров зоны ядра, диффузионной зоны и зоны чистого масла проводим контуры эллипсов по границам зон и выбором операции *Measure* получаем результаты измерений площадей соответствующих эллипсов ($S_1$, $S_2$, $S_3$) в отдельном окне *Results.* На рисунке 3 в качестве примера представлены результаты определения площадей (*Area*) эллипсов для моторного масла с наработкой 33 ч, а в таблице 1 – измеренные площади для всех рассматриваемых масел, рассчитанные площади ядра $S_{ядр}$, диффузионной зоны $S_{диф}$ и зоны чистого масла $S_м$, а также их относительная доля на хроматограмме масляного пятна.

Таким образом, представленный метод позволяет получать четкие светящиеся контуры всех кольцевых зон даже на низкоконтрастных хроматограммах и может быть использован для высокоточного автоматизированного измерения размеров зон.

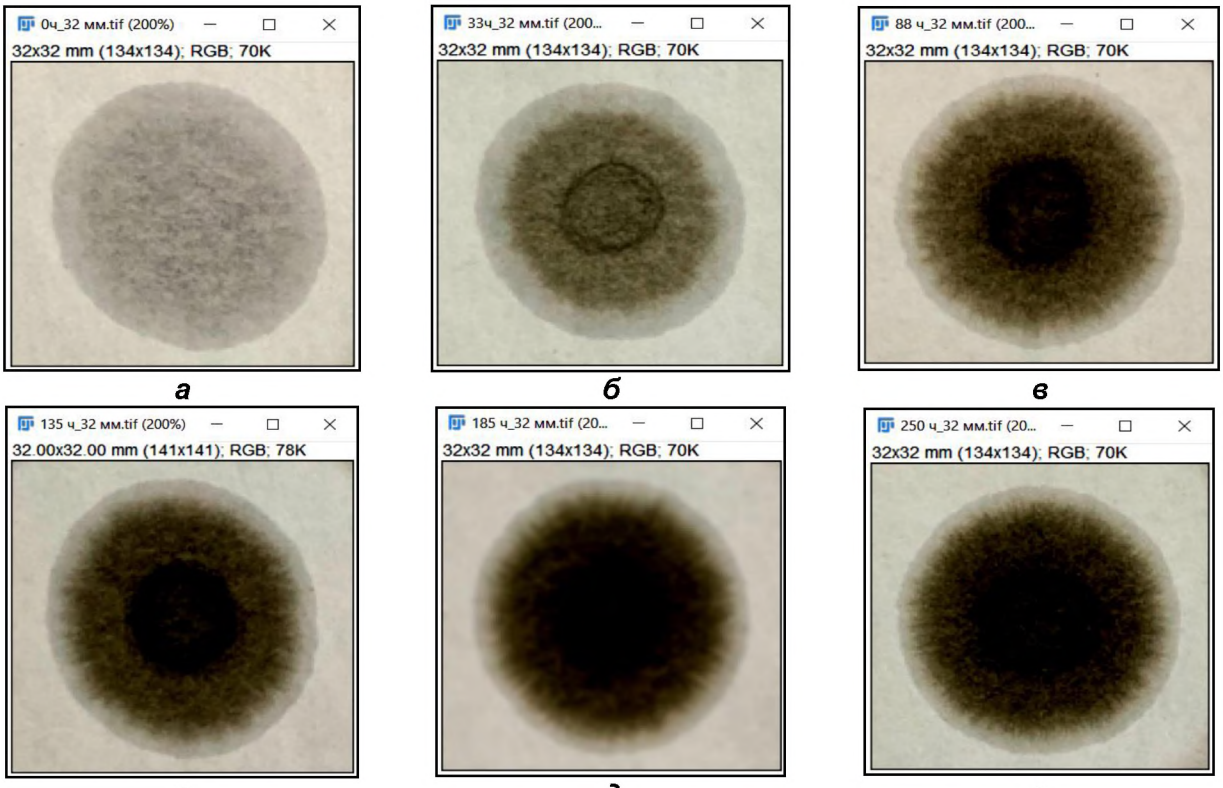



*Рисунок 1. Цифровые изображения хроматограмм моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой: а – 0 ч; б – 33 ч; в – 88 ч; г – 135 ч; д – 185 ч; е – 250 ч*

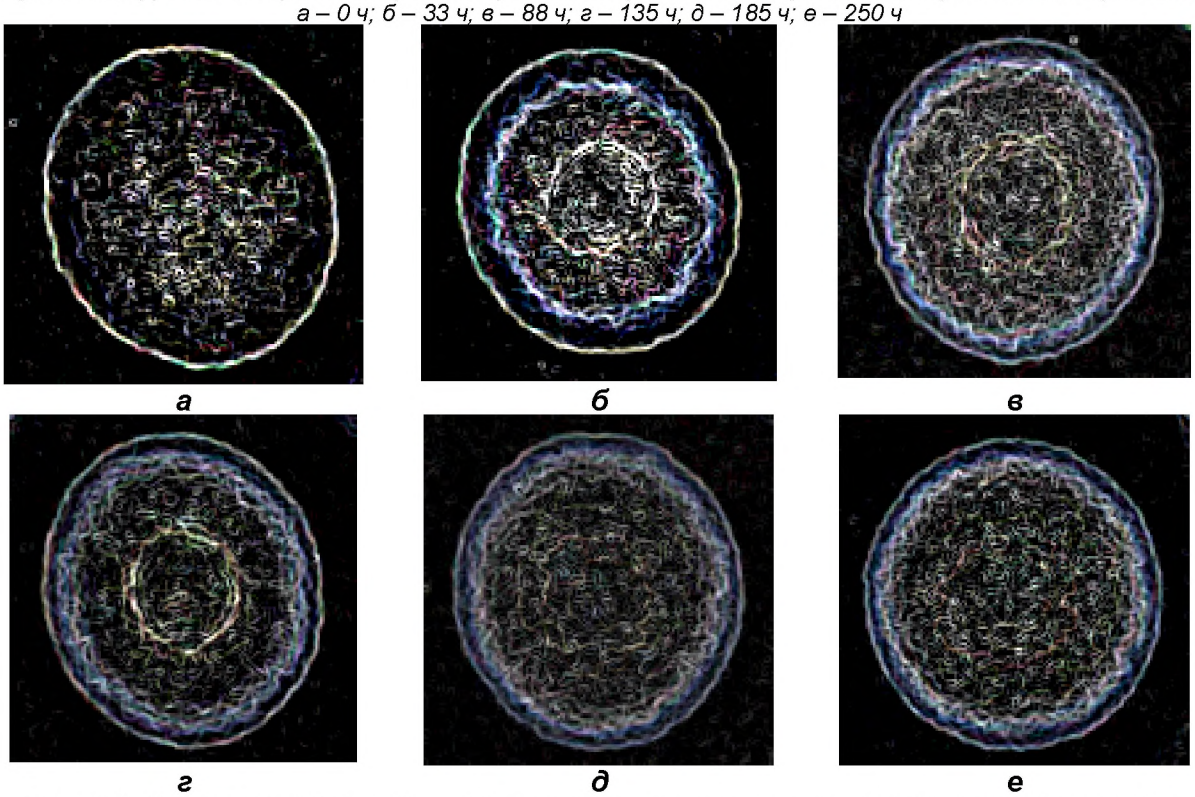



*Рисунок 2. Цифровые изображения с выделенными границами на хроматограммах моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой: а – 0 ч; б – 33 ч; в – 88 ч; г – 135 ч; д – 185 ч; е – 250 ч*

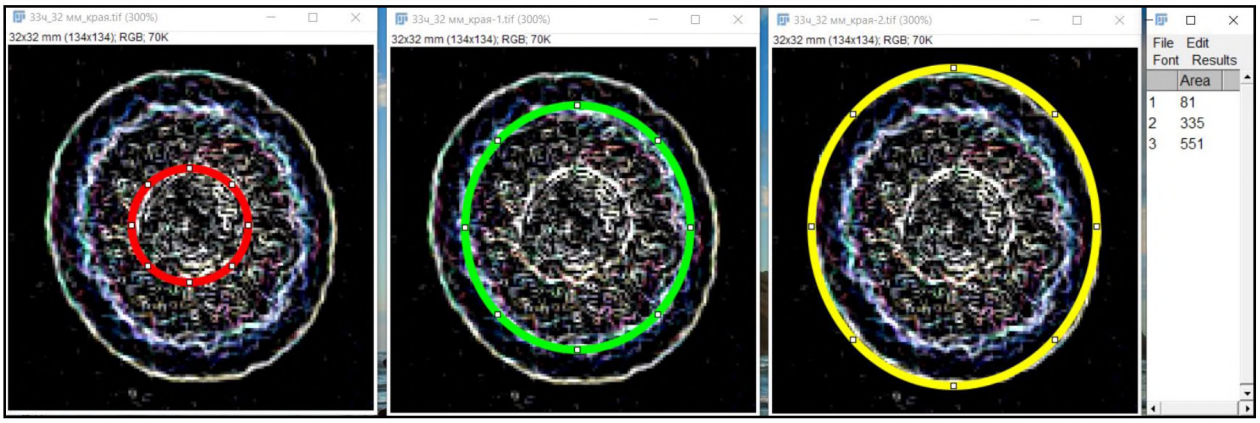



*Рисунок 3. Методика определения размеров кольцевых зон на хроматограмме*

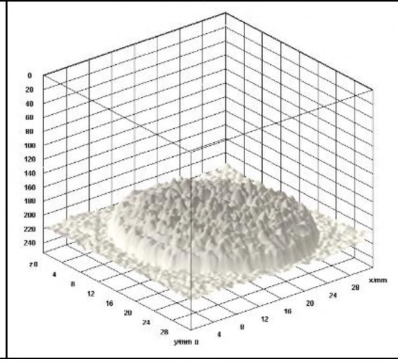
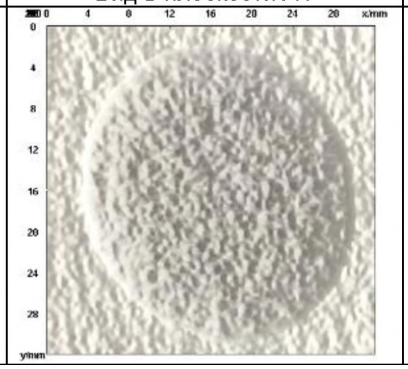
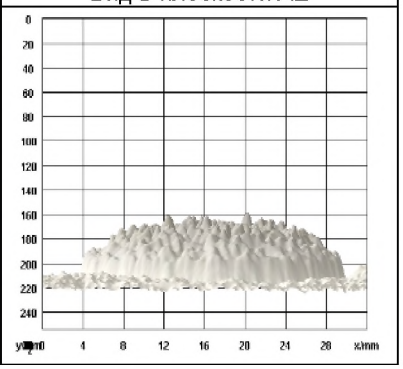
**Таблица 1. Размеры кольцевых зон на хроматограммах моторного масла**

| Наработка, ч | $S_1$, мм$^2$ | $S_2$, мм$^2$ | $S_3$, мм$^2$ | $S_{ядр}$, мм$^2$ | $S_{ядр}$, % | $S_{диф}$, мм$^2$ | $S_{диф}$, % | $S_м$, мм$^2$ | $S_м$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 576 | 0 | 0 | 0 | 0 | 576 | 100,0 |
| 33 | 81 | 335 | 551 | 81 | 14,7 | 254 | 46,0 | 217 | 39,3 |
| 88 | 103 | 488 | 602 | 103 | 17,1 | 385 | 64,0 | 114 | 18,9 |
| 135 | 115 | 488 | 590 | 115 | 19,5 | 373 | 63,2 | 102 | 17,3 |
| 185 | 367 | 499 | 597 | 367 | 61,5 | 132 | 22,1 | 98 | 16,4 |
| 250 | 378 | 511 | 597 | 378 | 63,3 | 133 | 22,3 | 86 | 14,4 |

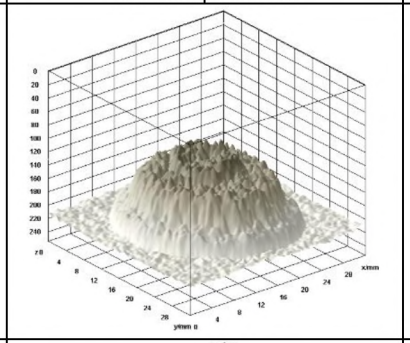
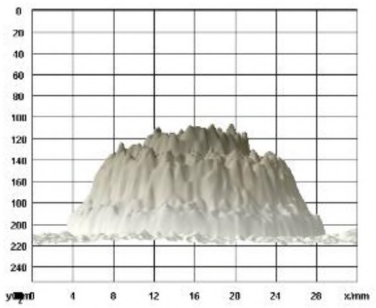
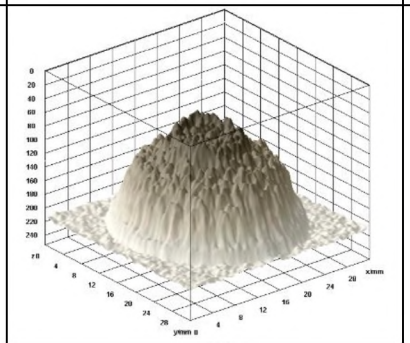
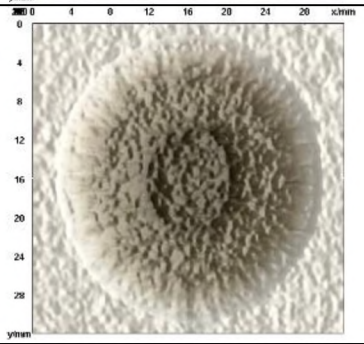
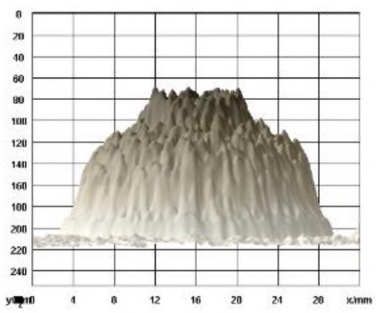
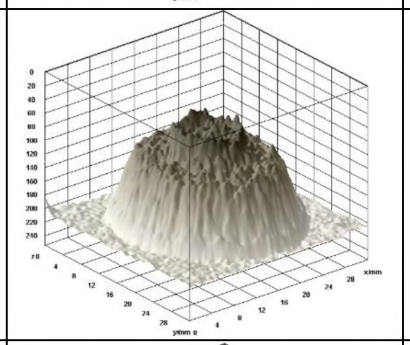
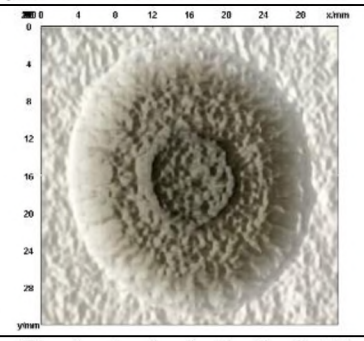
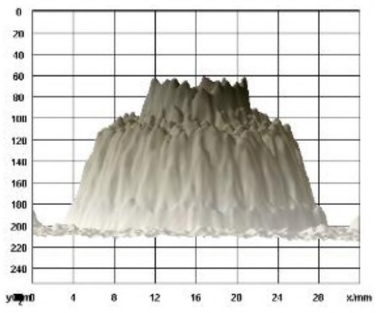
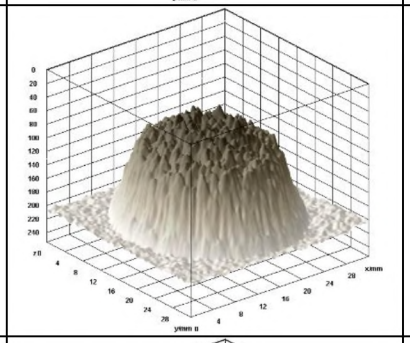
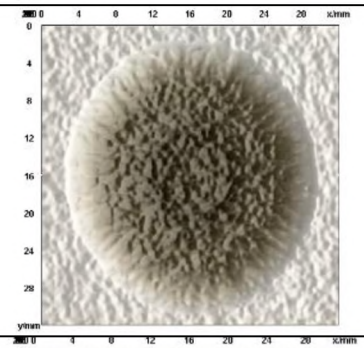
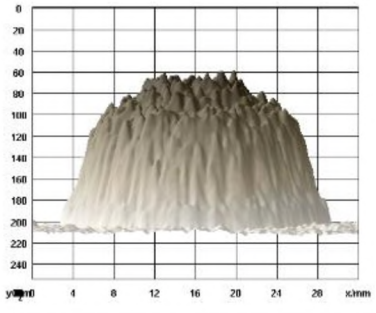
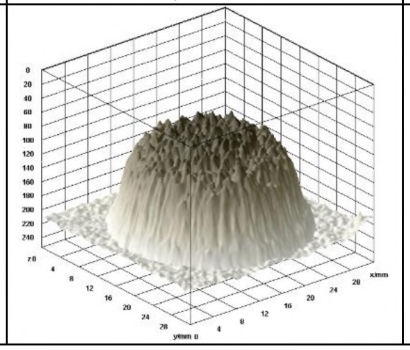
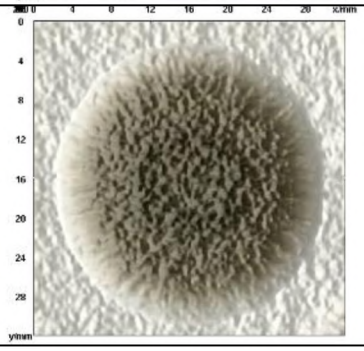
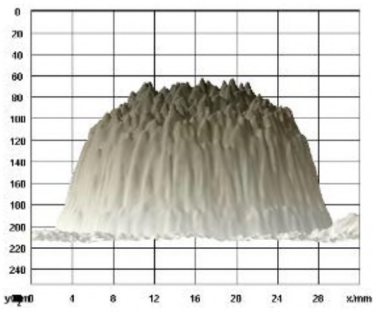
**Метод трехмерной визуализации поверхности (Interactive 3D Surface Plot)**. Предлагаемый метод основан на использовании плагина *Interactive 3D Surface Plot* программного комплекса *ImageJ*, который позволяет визуализировать изображение в координатах *X*, *Y* и *Z*: реальное изображение и размеры отображаются на координатной плоскости *XY*, а интенсивность окрашивания изменяется в диапазоне от 0 ед. (черный цвет) до 255 ед. (белый цвет) – по оси *Z*. Плагин *Interactive 3D Surface Plot* предоставляет ряд возможностей настройки визуализации изображения: формат отображения; выбор цветовой палитры; уровни сглаживания и освещения; инверсия значений; выбор цвета фона и линий; масштабирование и др.

Плагин *Interactive 3D Surface Plot* позволяет преобразовать двумерное изображение масляного пятна в трехмерное – поверхностную диаграмму, на которой оси *X* и *Y* соответствуют пространственным координатам на изображении масляного пятна, а ось *Z* (высота) – интенсивности окрашивания в каждой точке этой плоскости *XY*, что, в свою очередь коррелирует с концентрацией примесей в данном месте пятна. Хотя плагин ориентирован на визуализацию, он позволяет определять размеры кольцевых зон масляного пятна на координатной плоскости *XY* и оценивать их окраску по оси *Z*. Создавая 3*D*-модели для разных хроматограмм, можно визуально сравнивать их структуру и интенсивность окрашивания. Результаты представления цифровых изображений хроматограмм моторного масла Лукойл Авангард 10*W*40 с различной наработкой с использованием плагина *Interactive 3D Surface Plot* приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Цифровые изображения хроматограмм моторных масел с различной наработкой τ, полученные с использованием плагина *Interactive 3D Surface Plot***

| τ, ч | 3*D*-изображение | Вид в плоскости *XY* | Вид в плоскости *XZ* |
|---|---|---|---|
| 0 |  |  |  |

**Продолжение таблицы 2**

| τ, ч | 3*D*-изображение | Вид в плоскости *XY* | Вид в плоскости *XZ* |
|---|---|---|---|
| 33 |  | |  |
| 88 |  |  |  |
| 135 |  |  |  |
| 185 |  |  |  |
| 250 |  |  |  |

Последовательный анализ хроматограмм с наработкой от 0 до 250 ч (табл. 2) позволяет описать процесс деградации (старения) моторного масла, проявляющийся в потере диспергирующей способности присадок и генерирования нерастворимых продуктов загрязнения. Так, для свежего моторного масла (наработка 0 ч) пятно характеризуется максимальным значением интенсивности окрашивания (более 160 ед.) с едва заметным периферийным кольцом, обусловленным капиллярной диффузией базового масла. В 3*D*-модели поверхность практически плоская, с минимальной шероховатостью, что свидетельствует об отсутствии сажи и продуктов разложения моторного масла.

Для масла с наработкой 33 ч сформировано ядро с выраженной кольцевой зоной, характеризуемой пониженной интенсивностью окраски (110-130 ед.) и обусловленной наличием в ней сажи и начальных продуктов термического разложения моторного масла. Вокруг ядра располагается диффузионная зона с интенсивностью окрашивания 130-190 ед., за которой следует зона чистого масла с интенсивностью окрашивания более 190 ед. 3*D*-поверхность характеризуется выраженным центральным пиком конической формы и кольцевым валиком, отражающим зону частичного удержания сажевых частиц остаточно активными диспергирующими присадками.

Для масла с наработкой 88 ч интенсивность окрашивания ядра снижается (70-100 ед.), кольцевая зона расширяется. В 3*D*-модели центральный пик становится острее и выше, с расширением его основания, указывающим на начало процесса коагуляции сажевых частиц, что может быть объяснено частичным истощением антиокислительных присадок.

При наработке 135-185 ч топография поверхности претерпевает выраженный переход от одного доминирующего центрального пика к широкому приподнятому плато с множеством слившихся гребневидных структур, интенсивность окрашивания достигает 60 ед. Данные изменения коррелируют с развитием автокаталитического окисления базового масла, сопровождающегося быстрым накоплением пероксидов, деструкцией углеводородных цепей и последующей поликонденсацией с образованием высокомолекулярных асфальтеноподобных продуктов.

При наработке 250 ч пятно приобретает равномерно темную окраску, без выраженных зон ядра и диффузии и четких границ между ними. 3D- поверхность характеризуется высокой степенью неоднородности, полной утратой центрального пика, равномерно низкими значениями интенсивности окрашивания по всей площади (~70 ед.). Указанные признаки свидетельствуют о полной деактивации диспергирующих присадок и равномерной седиментации полидисперсных нерастворимых агрегатов, включающих сажу, асфальтеноподобные продукты окислительной полимеризации и иные высокомолекулярные соединения – конечные продукты деградации смазочного материала.

Таким образом, применение плагина *Interactive 3D Surface Plot* к изображениям хроматограмм моторного масла обеспечивает наглядную и количественную визуализацию процессов старения моторного масла, позволяет объективно фиксировать критические точки деградации (начало коагуляции сажи при 80-100 ч и переход к автокаталитическому окислению при 130-150 ч), а также может быть рекомендовано в качестве экспресс-метода мониторинга состояния смазочных материалов в эксплуатации и при разработке новых композиций.

**Метод диаметральной денситометрии (Diametral Densitometry Method).** Предлагаемый метод оценки интенсивности окрашивания и размеров зон масляного пятна на хроматограммах основан на использовании встроенного в программу *ImageJ* интсрумента *Plot Profile*. Этот инструмент позволяет анализировать интенсивность пикселей вдоль заданной линии на изображении и строить график зависимости интенсивности от расстояния. При анализе хроматограммы для построения такого графика необходимо провести линию на изображении хроматограммы, проходящую через центр масляного пятна, и выбором команд *Analyze* → *Plot Profile* получить окончательное изображение графика зависимости интенсивности окрашивания вдоль проведенной линии.

Зависимости распределения интенсивности по диаметру масляного пятна позволяют получать следующую информацию. Во-первых, низкие значения интенсивности на графиках указывают на более плотные и темноокрашенные зоны, что коррелирует с концентрацией продуктов загрязнения в моторном масле. Во-вторых, по ширине пиков или впадин интенсивности можно измерить размеры кольцевых зон масляного пятна. В-третьих, сравнение графиков хроматограмм масел с различной наработкой позволяет оценить степень деградации моторного масла. Важным преимуществом инструмента, помимо построения графических зависимостей, является возможность получения численных значений изменения интенсивности окрашивания в диаметральном направлении в формате «.csv», совместимым с *Excel*, что позволяет проводить дальнейшую статистическую обработку и автоматизированный расчет диагностических параметров без дополнительных программ.

На рисунке 4 представлены полученные графики интенсивности окрашивания зон масляного пятна для хроматограмм моторного масла с различной наработкой.

Анализ полученных зависимостей позволяет выявить следующие закономерности. Интенсивность окрашивания в центре пятна снижается с ~160 до ~55 ед. в интервале 0-135 ч, после чего стабилизируется на уровне 60-70 ед., что является признаком насыщения системы нерастворимыми продуктами. Ширина зоны ядра линейно растет с 0 до ~88 ч, затем резко увеличивается и после 135 ч перестает определяться – границы зон исчезают. Разность между интенсивностью окрашивания зоны ядра и диффузионной зоны уменьшается с ~100 ед. (33-88 ч) до <20 ед. после 185 ч, что является объективным количественным критерием полной потери диспергирующей способности. Точка перегиба всех кривых (резкое выравнивание профиля) наблюдается в интервале 135-185 ч и совпадает с переходом окисления в автокаталитический режим.

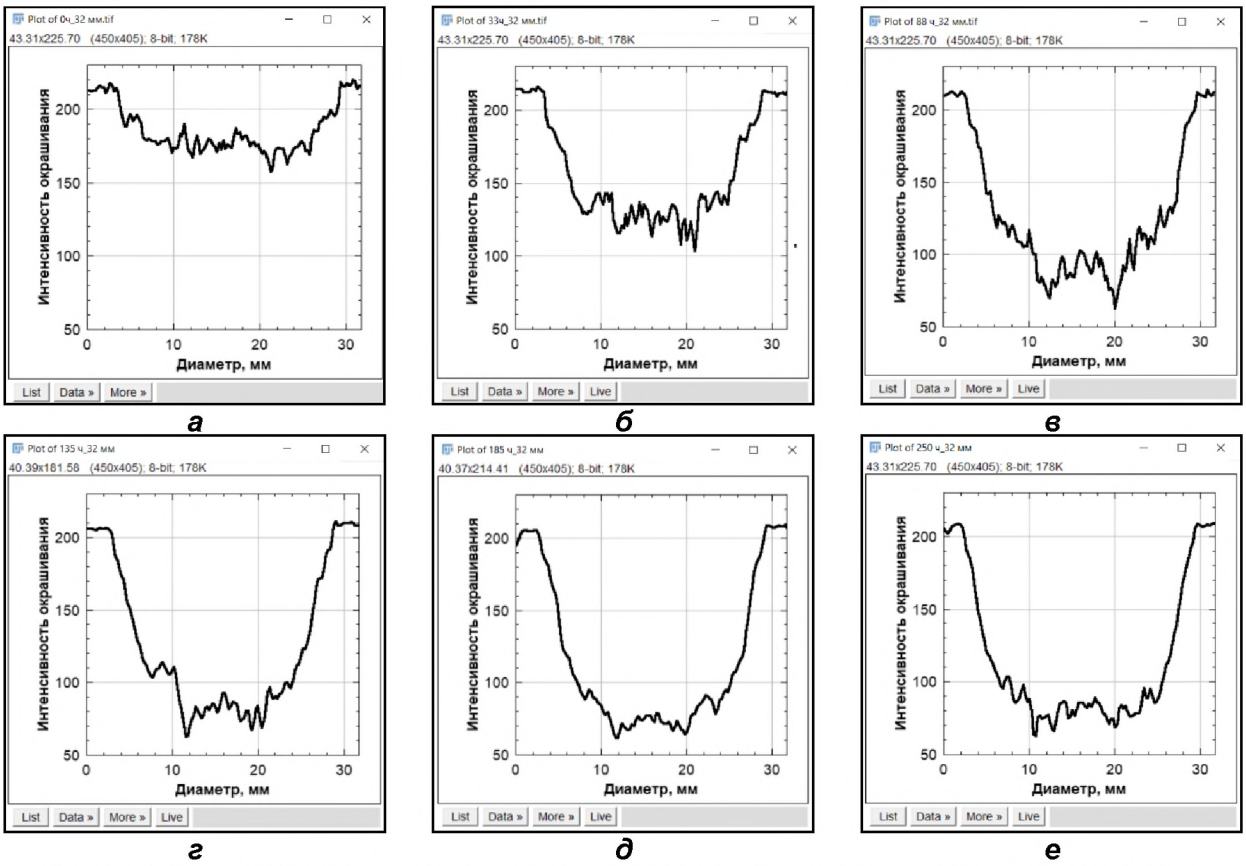



*Рисунок 4. Изменение интенсивности окрашивания по диаметру масляного пятна моторного масла с различной наработкой: а – 0 ч; б – 33 ч; в – 88 ч; г – 135 ч; д – 185 ч; е – 250 ч*

Таким образом, метод диаметральной денситометрии позволил количественно подтвердить три стадии деградации масла Лукойл Авангард 10*W*40: 0-80 ч – накопление сажи при сохраненной диспергирующей способности; 80-135 ч – прогрессирующая коагуляция сажевых частиц и расширение зоны ядра; после 135 ч – полная утрата зональной структуры профиля вследствие автокаталитического окисления и образования высокомолекулярных нерастворимых продуктов.

Полученные данные полностью коррелируют с результатами метода «свечения границ» и метода трехмерной визуализации поверхности и показывают необходимость замены моторного масла при наработке более 200 ч, что подтверждает высокую информативность и взаимодополняемость разработанного комплекса цифровых методов анализа масляных пятен.

**Заключение**

Разработанный комплекс из трех взаимодополняющих методов цифровой обработки хроматограмм капельной пробы (метод «свечения границ», метод трехмерной визуализации поверхности и метод диаметральной денситометрии) позволяет объективно и с высокой воспроизводимостью оценивать степень деградации моторного масла непосредственно в условиях эксплуатации. Все методы реализованы в свободно распространяемом программном комплексе *ImageJ*, не требуют дорогостоящего оборудования и занимают не более 5-7 минут на одну пробу.

Применение комплекса к моторному маслу Лукойл Авангард 10*W*40 с наработкой 0-250 ч выявило три характерные стадии старения: сохраненную диспергирующую способность до 80 ч, прогрессирующую коагуляцию сажи в интервале 80-135 ч и лавинообразное автокаталитическое окисление с полной потерей зональной структуры после 135 ч. Полученные результаты полностью согласуются между собой и с известными физико-химическими закономерностями деградации смазочных материалов.

Предложенные методы могут быть рекомендованы для внедрения в системы мониторинга состояния моторного масла автотракторной техники на предприятиях АПК, а также для использования при разработке и испытаниях новых пакетов присадок и смазочных композиций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. Способ определения необходимости замены масла в дизелях: а.с. СССР 201768 / Н.С. Пасечников, Н.М. Хмелевой. – Опубл. 22.11.1967.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Ferreira, T. ImageJ user guide /Fiji 1.46 / T. Ferreira, W. Rasband. – 2012. – 198 p.

7. Treloar, K.K. Sensitivity of edge detection methods for quantifying cell migration assays / K.K. Treloar, M.J. Simpson //. PLoS One. – 2013. – Jun. 24. – № 8 (6). – e67389. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067389.

8. Intarapanich, A. Fast processing of microscopic images using object-based extended depth of field / A. Intarapanich [et al.] // 15-th International Conference On Bioinformatics (INCOB 2016), 21–23 September 2016. – Singapore, Queenstown, 2016. – P. 229-237.

9. Martinez, M.A.F. Surface roughness of titanium disks influences the adhesion, proliferation and differentiation of osteogenic properties derived from human / M.A.F. Martinez [et al.] // International Journal of Implant Dentistry. – 2020. – № 6 (1). https://doi.org/10.1186/s40729-020-00243-5.

10. Breitenbach, S.F.M. Acquisition and analysis of greyscale data from stalagmites using ImageJ software / S.F.M. Breitenbach, N. Marwan // Cave and Karst Science. – 2023. – Vol. 50. № 2. – P. 69-78.

11. Martino, C.A. Microfluidic Live-Imaging Technology to Perform Research Activities in 3D Models / C.A. Martino, D. Vigo //Annals of Advanced Biomedical Sciences. – 2021. – Vol. 4. – Issue 1. – 00160. https://doi.org/10.23880/aabsc-16000160.

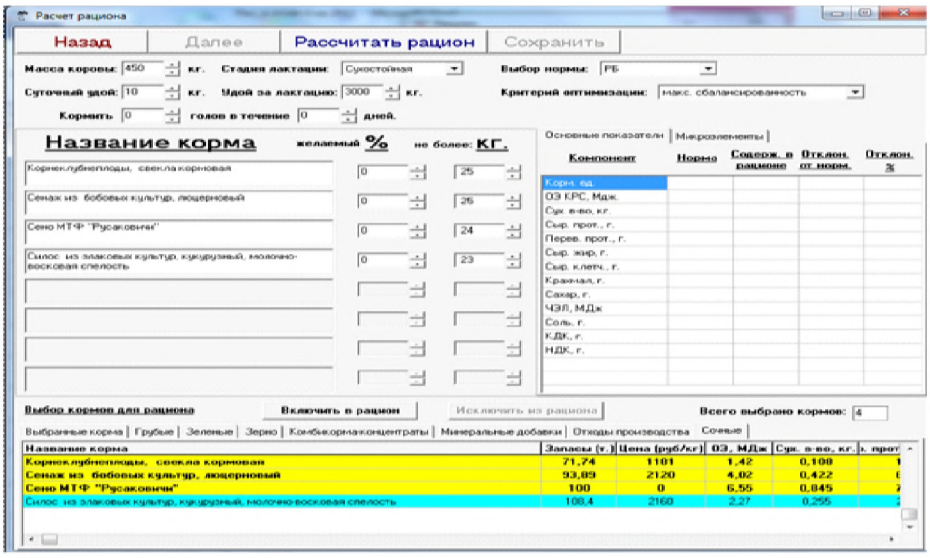
ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.12.2025

## Программа балансирования рационов кормов для молочного скота

Программа балансирования рационов разработана по заданию РНТП «Развитие Минской области» и ***предназначена*** для создания рационов кормов для молочного скота с учетом показателей углеводного состава кормов и чистой энергии лактации.

Программа работает в интерактивном режиме. Пользователь имеет возможность выбрать корма, задав предварительно структуру рациона, и далее в процессе оптимизации отслеживать состояние баланса по всем показателям питательности.

Созданная программа предоставляет животноводам широкие возможности формирования рациона молочного скота.

Интерфейс программы позволяет конечному пользователю редактировать базу данных и пополнять ее за счет местных кормов.

***Программа внедряется на молочных фермах Минской области.***