

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,

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

В.М. Капцевич,

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

В статье предложена, разработана и апробирована альтернативная бесприборная методика оценки диспергирующей способности и загрязненности моторного масла согласно стандарту ASTM D7899 с использованием открытого программного комплекса ImageJ и плагина Radial Profile. Методика включает получение хроматограммы методом «капельной пробы», цифровую обработку изображения, расчет параметров средней интенсивности окраски, коэффициента неоднородности, радиального распределения, диспергирующей способности, индекса загрязненности и интегрального показателя качества по открытым формулам. Апробация на моторном масле Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 0–250 ч подтвердила прогрессирующую деградацию свойств, указывающую на необходимость замены масла. Предложенная методика обеспечивает доступную, мобильную и объективную диагностику в полевых условиях агропромышленного комплекса, исключая использование дорогостоящего прибора DT100.

Ключевые слова: моторное масло, диспергирующая способность, загрязненность, метод «капельной пробы», ASTM D7899, ImageJ, Radial Profile.

An alternative instrument-free method for assessing the dispersancy and contamination level of motor oil according to ASTM D7899 has been proposed, developed, and tested using the open-source ImageJ software package and the Radial Profile plugin. The method includes obtaining a chromatogram using the Blotter Spot" method, digital image processing, and calculating the average color intensity, heterogeneity coefficient, radial distribution, dispersancy, contamination index, and integral quality index parameters using open formulas. Testing on Lukoil Avangard 10W40 motor oil with 0–250 hours of operation confirmed progressive degradation of its properties, indicating the need for oil change. The proposed method provides accessible, mobile, and objective diagnostics in the field, eliminating the need for the expensive DT100 instrument.

Keywords: motor oil, dispersancy, contamination, spot test method, ASTM D7899, ImageJ, Radial Profile.

Введение

Эксплуатационная надежность сельскохозяйственной техники является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность и конкурентоспособность агропромышленного комплекса. Высокие нагрузки, запыленность и частые простои в периоды посевных и уборочных кампаний делают задачу оперативного контроля за техническим состоянием ДВС чрезвычайно актуальной. Одним из источников состояния ДВС является работающее моторное масло [1].

Одним из наиболее информативных методов экспресс-тестирования моторного масла является ме-

тод «капельной пробы» (*Blotter Spot*) [2]. Данный метод предусматривает получение хроматограммы, по размерам и цвету кольцевых зон которой можно определить степень загрязненности масла сажей и продуктами износа ДВС, присутствие воды и топлива, а также оценить моюще-диспергирующие свойства, что в конечном итоге позволяет прийти к заключению о возможности дальнейшего использования моторного масла.

В большинстве вариантов реализации метода «капельной пробы» анализ полученных хроматограмм сводится к органолептической оценке [3, 4]. В последнее время разработаны и разрабатываются ме-

тоды, заменяющие такую визуальную оценку. Так, в работе [5] для анализа хроматограмм авторами предложены такие методы цифровой обработки с использованием программного комплекса *ImageJ* [6], как метод «свечения границ» (*Glow Edges*), метод трехмерной визуализации поверхности (*Interactive 3D Surface Plot*) и метод диаметальной денситометрии (*Diametral Densitometry Method*). В то же время ведущими мировыми компаниями, занимающимися лабораторным контролем свойств топливно-смазочных материалов, разработаны приборы для анализа хроматограмм, полученных методом капельной пробы. Так, компанией *MOTORcheckUP GmbH* (Германия) разработан тестовый блок *iDiA* [7], подключаемый к компьютеру (рис. 1) и позволяющий регистрировать изображения хроматограммы и давать оценку состоя-



Рисунок 1. Тестовый блок *iDiA* [8]

ния масла путем компьютеризованного сравнения полученного изображения с набором эталонных изображений. Недостатком метода, основанного на использовании такого оборудования, является то, что оценка состояния моторного масла осуществляется без получения количественных показателей свойств моторного масла.

Компанией *AD Systems* (Франция) разработан прибор *DT100* (рис. 2) [9], принцип действия которого основан на автоматическом и объективном анализе хроматограммы масла с использованием цифровой обработки изображения согласно *ASTM D7899* [10]. Однако метод, рассмотренный в *ASTM D7899* и основанный на действии прибора *DT100*, характеризуется следующими недостатками: высокой стоимостью оборудования и невозможностью его использования в полевых условиях; закрытостью алгоритмов расчета, исключающей независимую проверку результатов; зависимостью результатов от приборных параметров (освещенности, состояния оптики, настроек камеры).

Целью данной работы является разработка альтернативной бесприборной методики оценки диспергирующей способности и загрязненности моторного масла, основанной на стандарте *ASTM D7899*, с использованием программного комплекса *ImageJ*.

Основная часть

Согласно *ASTM D7899*, метод «капельной пробы» предусматривает получение хроматограммы масляного пятна, фиксацию цифрового изображения хроматограммы и его анализ при помощи специализированного прибора *DT100* с установленным в нем программным обеспечением. Программное обеспечение прибора автоматически выполняет калибровку изображения и вычисляет распределение оптической непрозрачности (*opacity*) в 16 кольцевых зонах масляного пятна в двух взаимно перпендикулярных направлениях *x* и *y*. На основании этих данных рассчитываются три характеристики состояния масла:

- диспергирующая способность *MD* – оценка равномерности распределения загрязнений по масляному пятну;
- индекс загрязненности *IC* – количественная оценка содержания нерастворимых примесей;
- интегральный показатель качества *DP* – совокупная оценка состояния масла.

Расчеты выполняются по алгоритмам, встроенным в программное обеспечение прибора, при этом часть формул (в частности, для *IC*) является ноу-хау производителя и не раскрывается в стандарте.

Разрабатываемая методика предполагает выполнение следующих основных стадий: получение цифрового изображения хроматограммы; обработка хроматограммы в программном комплексе *ImageJ*; вычисление характеристик масляного пятна; интерпретация полученных результатов.

Получение цифрового изображения хроматограммы. Для получения хроматограммы каплю моторного масла с помощью пипетки наносят на фильтровальную или хроматографическую бумагу, помещают в сушильную камеру, нагретую до температуры 80 °С, и выдерживают в течение 1 ч. После сушки хроматограмму извлекают и получают ее цифровое изображение с разрешением не менее 600 *dpi*, необ-



Рисунок 2. Прибор *DT100*

ходимым и достаточным для обработки в программном комплексе *ImageJ*, с использованием фотокамеры или сканера.

Обработка хроматограммы в программном комплексе ImageJ. Полученное изображение хроматограммы открывают в *ImageJ*, где выполняют масштабирование по радиусу масляного пятна и цифровую фильтрацию для удаления шумов. Далее используют плагин *Radial Profile* программы *ImageJ*, позволяющий получать численные значения изменения нормализованных интегрированных интенсивностей окраски вокруг концентрических окружностей в радиальном направлении от 0 (центр пятна) через каждый пиксель и визуализировать полученные данные в виде графических зависимостей. Полученные численные данные изменения интенсивности окраски I_{ri} в диапазоне от 255 до 0 по радиусу r_i , охватывающие всю площадь пятна, являются основой для дальнейших расчетов основных характеристик, предусмотренных стандартом *ASTM D7899*. Следует отметить, что в стандарте в отличие от плагина, во-первых, исходными данными для расчетов являются показатели непрозрачности, изменяющиеся в диапазоне от 0 до 255, и, во-вторых, эти показатели рассчитываются по 16 зонам через 1 мм радиуса как среднее арифметическое двух значений, определенных во взаимно перпендикулярных направлениях.

Вычисление характеристик масляного пятна. Для расчета основных показателей, подлежащих определению, согласно стандарту *ASTM D7899*, используют следующие выражения:

Диспергирующую способность MD определяют по формуле:

$$MD = (1 - DB) \cdot Ratio \cdot 100,$$

где DB – коэффициент неоднородности;

$Ratio$ – коэффициент радиального распределения.

Коэффициент неоднородности DB характеризует неоднородность интенсивности окраски масляного пятна и его рассчитывают по n значениям интенсивности I_{ri} и их среднему значению $I_{ср}$

$$DB = \frac{\sum_{i=1}^n |I_{ri} - I_{ср}|}{n \cdot I_{ср}}.$$

Эта зависимость представляет собой нормированную меру отклонения локальных интенсивностей от среднего уровня и характеризует неоднородность распределения загрязнений в моторном масле. В отличие от *ASTM D7899*, где анализ ведется по 16 дискретным зонам, расположенным в двух взаимно перпендикулярных радиальных направлениях, в предложенной методике интеграцию выполняют по всем пикселям радиального профиля, что обеспечивает непрерывную оценку распределения загрязнений и повышает чувствительность метода.

Коэффициент радиального распределения $Ratio$ определяют как отношение радиуса $r_{63,5}$, в пределах которого сосредоточено 63,5 % накопленной интенсивности, к полному радиусу масляного пятна r_{max}

$$Ratio = \frac{r_{63,5}}{r_{max}}.$$

Следует отметить, что формула для расчета $Ratio$ в *ASTM D7899* отсутствует и является ноу-хау программного обеспечения прибора *DT100*. Показатель $r_{63,5}$ нами выбран по аналогии с характеристическим радиусом в экспоненциальной модели диффузии загрязняющих частиц [11] и отражает степень равномерности распределения загрязнений по радиусу пятна.

Формула для расчета индекса загрязненности IC в *ASTM D7899* также отсутствует и является ноу-хау программного обеспечения прибора *DT100*. Для расчета этой характеристики нами предложена эмпирическая линейная зависимость:

$$IC = 4,8 \frac{255 - I_{ср}}{155}.$$

Эта зависимость выражает обратную пропорциональность между интенсивностью окраски $I_{ср}$ изображения и содержанием нерастворимых примесей IC . Множитель 4,8 соответствует верхней границе загрязнения, принятой в *ASTM D7899* для отработанных масел (4,8 % нерастворимых примесей), а коэффициент 155 обеспечивает нормирование диапазона изменения интенсивности окраски (от 100 до 255 условных единиц).

Интегральный показатель качества DP рассчитывают по формуле

$$DP = (100 - MD) \cdot IC,$$

которая отражает совокупную оценку состояния масла, объединяя влияние диспергирующей способности и фактической загрязненности. Рост DP указывает на снижение эксплуатационных свойств масла и приближение предельного состояния.

Интерпретация полученных результатов. Интерпретацию результатов анализа осуществляют на основании рассчитанных параметров MD , IC и DP , характеризующих, соответственно, диспергирующую способность, загрязненность и интегральное состояние масла. Классификацию результатов состояния масла выполняют по следующим критериям.

Диспергирующая способность MD отражает способность масла удерживать твердые частицы загрязнений во взвешенном состоянии и предотвращать их агрегатирование:

- при $MD > 70$ – масло обладает высокой диспергирующей способностью, загрязнения распределены равномерно, агрегаты отсутствуют (состояние масла хорошее);
- при $MD = 50 \dots 70$ – диспергирующая способность удовлетворительная, наблюдается частичное укрупнение загрязнений (состояние масла удовлетворительное);
- при $MD < 50$ – масло потеряло диспергирующие свойства, загрязнения склонны к осаждению (состояние неудовлетворительное).

Индекс загрязненности IC характеризует относительное содержание нерастворимых примесей, вычисляемое по оптическим свойствам хроматограммы:

– $IC < 2,0$ % – содержание загрязнений незначительное (состояние масла хорошее);

– $IC = 2,0 \dots 4,0$ % – повышенное содержание твердых частиц (состояние масла удовлетворительное);

– $IC > 4,0$ % – загрязнение достигло предельного уровня (состояние масла неудовлетворительное).

Интегральный показатель качества DP объединяет влияние диспергирующей способности и степени загрязненности и служит итоговой характеристикой эксплуатационного состояния масла:

– $DP < 100$ – состояние масла хорошее, ресурс не исчерпан;

– $DP = 100 \dots 200$ – состояние удовлетворительное, масло пригодно к эксплуатации при сокращенном интервале замены;

– $DP > 200$ – состояние неудовлетворительное, требуется замена масла.

Блок-схема разработанной альтернативной бесприборной методики оценки свойств моторного масла согласно *ASTM D7899* представлена на рисунке 3.

В качестве объектов исследования выбраны цифровые изображения моторных масел марки Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 0, 33; 88; 135; 185 и 250 ч, которые прошли этап масштабирования и цифровой фильтрации в программе *ImageJ*, представленные ранее в работе [5 (рис. 1)].

С помощью плагина *Radial Profile* получали графические зависимости нормализованной интегрированной интенсивности окраски I_r от радиуса r масляных пятен. Их анализ показал, что с увеличением

наработки форма радиального профиля становится более крутой, что указывает на накопление крупных агрегатов загрязнений и потерю диспергирующих свойств масла. Кроме того, для каждой наработки получали численные значения этих параметров в виде таблицы с шагом по радиусу, равным одному пикселю (0,32 мм).

Полученные численные данные экспортировали в *Microsoft Excel* и выполняли вычисления показателей $I_{\text{ср}}$, DB , $Ratio$, MD , IC и DP согласно приведенным зависимостям. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Анализ полученных данных подтверждает прогрессирующую деградацию свойств масла в процессе эксплуатации ДВС. Средняя интенсивность окраски $I_{\text{ср}}$ снижается с 180,3 до 93,7, указывая на накопление сажи и нерастворимых примесей. Коэффициент неоднородности DB возрастает с 0,04 до 0,21 (с пиком на 185 ч), указывая на агломерацию частиц и потерю равномерности распределения загрязнителей из-за истощения диспергирующих присадок. Коэффициент радиального распределения $Ratio$ демонстрирует умеренный рост с 0,64 до 0,73, свидетельствуя о смещении зоны интенсивного загрязнения к периферии, но в сочетании с другими параметрами это маскирует общую потерю контроля над дисперсией.

Диспергирующая способность MD падает с 61,71 до 57,52, переходя из категории «хорошо» (50...70) в «удовлетворительно» (30...50), что повышает риск образования лаковых отложений на деталях цилиндра-поршневой группы и клапанах. Содержание

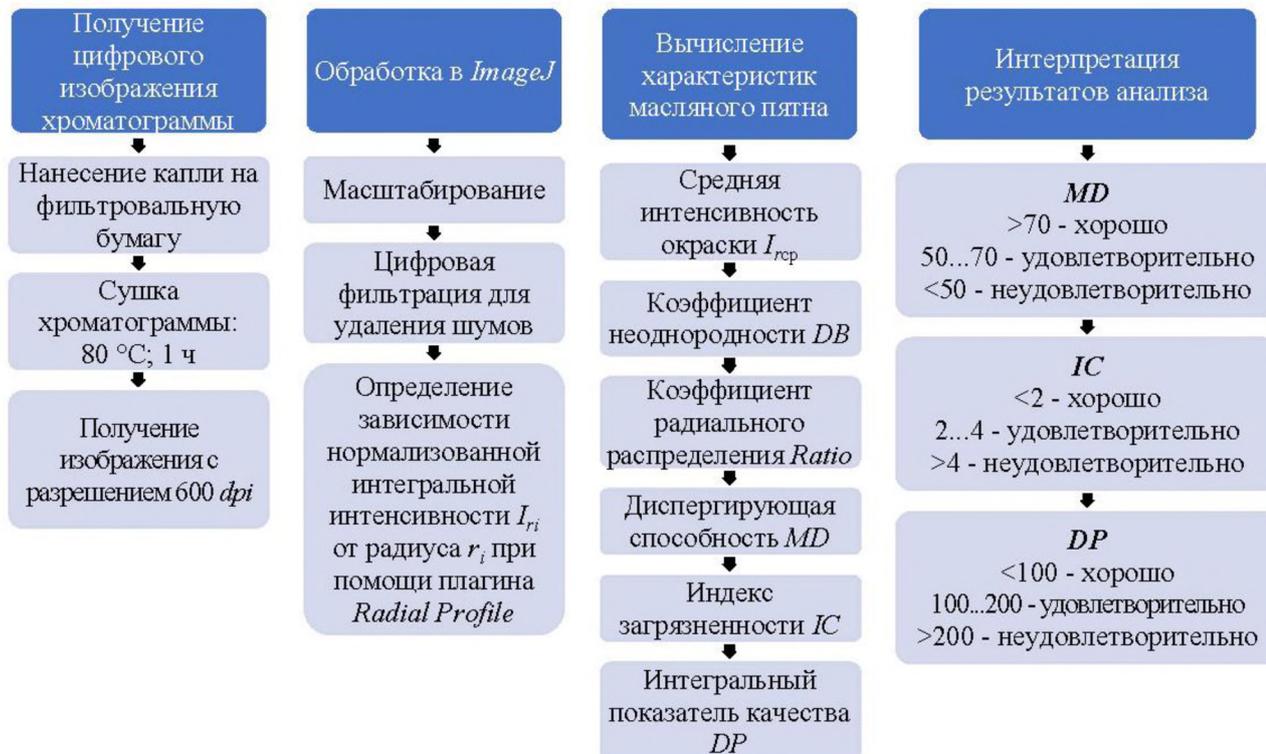


Рисунок 3. Блок-схема методики оценки свойств моторного масла согласно *ASTM D7899*

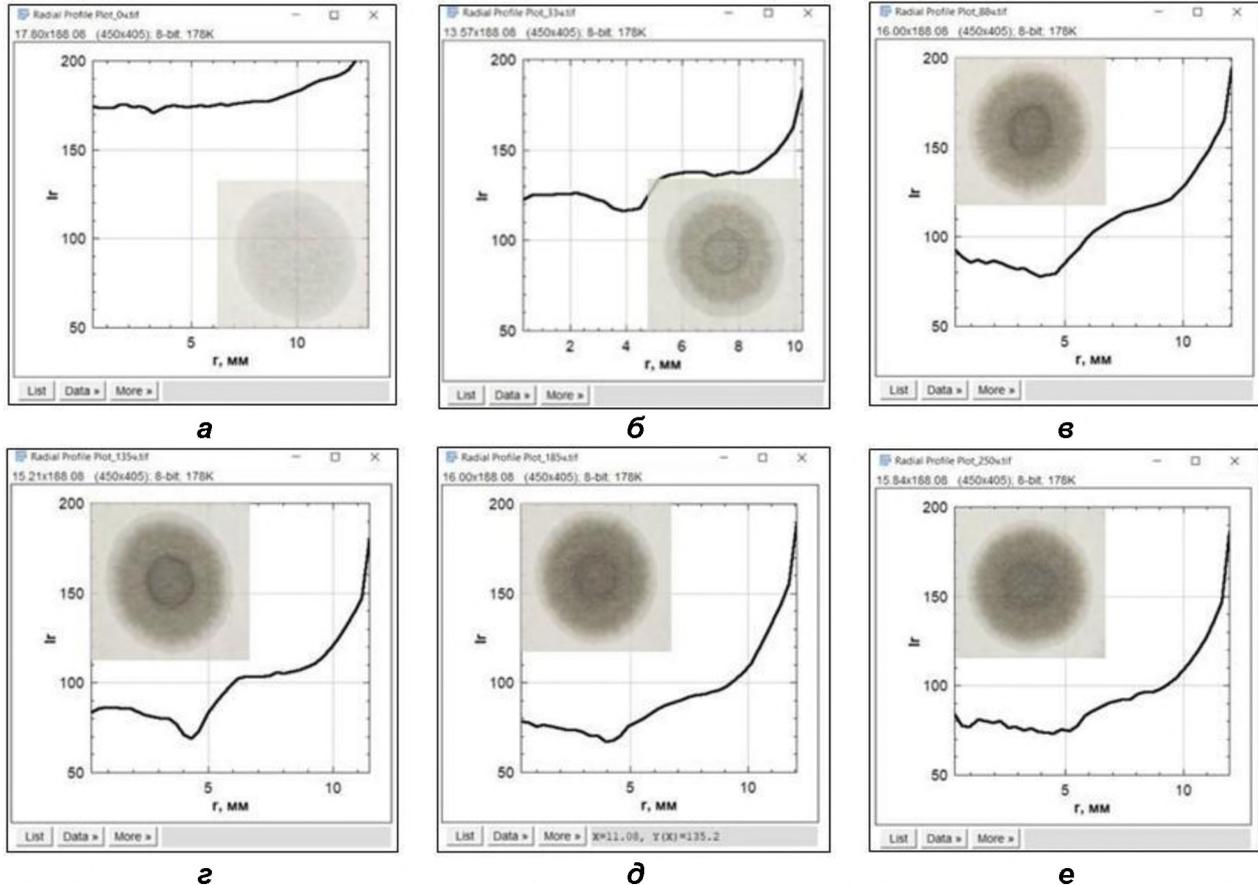


Рисунок 4. Графические зависимости нормализованной интегрированной интенсивности окраски I , от радиуса r масляных пятен для моторных масел с наработкой: а – 0 ч; б – 33 ч; в – 88 ч; з – 135 ч; д – 185 ч; е – 250 ч

нерастворимых примесей IC увеличивается с 2,31 % до 5,01 %, превышая критический порог 4 % уже на 88 ч наработки, что может вызвать забивку масляного

плекса *ImageJ* и плагина *Radial Profile* позволяет объективно определять ключевые характеристики (MD , IC , DP) без применения специализированного оборудования, такого как *DT100*. Получение хроматограммы методом капельной пробы, цифровая обработка изображения и расчеты по открытым формулам обеспечивают прозрачность и воспроизводимость результатов, преодолевая ограничения стандарта, связанные с закрытостью алгоритмов и

Таблица 1. Рассчитанные значения параметров, характеризующих состояние моторного масла

Наработка, ч	$I_{\text{ср}}$	DB	$Ratio$	MD	$IC, \%$	DP
0	180,30	0,04	0,64	61,71	2,31	88,58
33	133,71	0,08	0,66	60,52	3,76	148,30
88	107,65	0,20	0,70	56,00	4,56	200,79
135	99,75	0,17	0,70	58,04	4,81	201,72
185	93,27	0,21	0,73	57,83	5,01	211,21
250	93,70	0,18	0,70	57,52	5,00	212,20

фильтра, рост вязкости и ускорение изнашивания трибосопряжений. Обобщенный показатель качества DP возрастает с 88,58 до 212,2, переходя порог 200 на 88 ч, что однозначно указывает на необходимость замены масла для предотвращения нарушений в работе ДВС, таких как неполное сгорание топлива, попадание пыли и генерирование продуктов окисления.

Закключение

Разработанная альтернативная бесприборная методика оценки диспергирующей способности и загрязненности моторного масла согласно стандарту *ASTM D7899* с использованием программного ком-

высокой стоимостью.

Апробация методики на моторном масле Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой (0...250 ч) выявила типичные закономерности деградации: снижение средней интенсивности окраски $I_{\text{ср}}$ с 180,3 до 93,7; рост коэффициента неоднородности DB с 0,04 до 0,21; умеренное увеличение $Ratio$ с 0,64 до 0,73; падение MD с 61,71 до 57,52; рост IC с 2,31 % до 5,01 % и DP с 88,58 до 212,2. Эти изменения отражают накопление сажи, продуктов окисления и износа, истощение диспергирующих присадок, агломерацию частиц и смещение загрязнений к периферии, что согласуется с положениями *ASTM D7899* и указывает

на переход масла в неудовлетворительное состояние уже на 88 ч эксплуатации.

Преимущества методики, такие как доступность благодаря бесплатному ПО, мобильность за счет возможности применения в полевых условиях АПК и независимость от приборных факторов, делают ее перспективной для оперативной диагностики на агропромышленных предприятиях Республики Беларусь. Применение методики позволит снизить затраты на ремонт техники и повысить ее надежность. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию с автоматизированными системами и сравнительную калибровку с лабораторными методами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Венцель, С.В. Применение смазочных материалов в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М.: 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, С.К. Карпович, В.К. Корнеева, И.В. Закревский. – Минск: БГАТУ, 2023. – 120 с.
3. Wolak, A. Ocena wartości użytkowej oleju silnikowego z zastosowaniem chromatografii bibulowej / A. Wolak, M. Krzyżaniak // NAFTA-GAZ. – 2017. – ROK LXXIII. – № 1. – S. 54-50.

4. Fitch, J.C. The Lubrication Field Test and Inspection Guide / J.C. Fitch. – Noria Corporation, 2000. – 36 p.

5. 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.

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

7. iDiA – die intelligente Online – Diagnose. Einfach. Schnell. Zuverlässig / MOTORcheckUP GmbH. – 2022. – URL:: <https://motorcheckup.com/idiadiagnostics/> (date of access: 02.01.2026).

8. Motor CheckUP. Health check for your engine / MR Engines. – 2025. – URL: <https://www.enginesmr.com/motor-checkup/> (date of access: 02.01.2026).

9. Lubricant Oil Dispensancy Tester DT 100: Operation Manual. – Adsystems, 2010. – 46 p.

10. Standard Test Method for Measuring the Merit of Dispensancy of In-Service Engine Oils with Blotter Spot Method: ASTM D7899-19. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. – 7 p.

11. Crank, J. The Mathematics of Diffusion / J. Crank. – Oxford: Clarendon Press, 1975. – 414 p.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.01.2026

Система микропроцессорного автоматизированного регулирования положения распределительной штанги относительно обрабатываемой поверхности

Предназначена для повышения равномерности внесения рабочего раствора пестицидов штанговыми опрыскивателями, снижения времени на подготовку агрегата к работе и его регулировки в процессе работы.

Система обеспечивает соблюдение постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью в процессе работы опрыскивателя, как на склонах, так и на равнинной местности.



Основные технические данные

Тип механизма изменения угла наклона штанги	Гидравлический
Тип системы	Микропроцессорная
Тип датчиков	Ультразвуковые
Диапазон измерения, м	0,4 – 2,0
Погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом, м	0,040
Время готовности системы к работе, мин.	до 1
Напряжение питающей сети, В	=12 ± 2,5
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	2
Масса, кг, не более	40