

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФЕРРОГРАФИЯ МОТОРНОГО МАСЛА – ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ДВС

В.К. Корнеева,

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

В.М. Капцевич,

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

И.В. Закревский,

ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ

В.В. Остриков,

студент БГАТУ

И.В. Литвинов,

студент БГАТУ

Разработан и изготовлен аналитический феррограф для анализа продуктов износа в моторном масле работающего двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автотракторной техники. Показаны возможности практического применения феррографа в агропромышленном комплексе (АПК).

Ключевые слова: аналитический феррограф, моторное масло, продукты износа, микроскопические исследования.

The analytical ferrograph for analyzing the wear products in the engine oil of the running internal combustion engine (ICE) of automotive tractor equipment was developed and manufactured. The opportunities of practical application of the ferrograph in agribusiness are shown.

Key words: analytical ferrograph, engine oil, wear products, microscopic studies.

Введение

Одним из важнейших конструктивных элементов работающего ДВС является моторное масло, от качества которого во многом зависит надежность работы всех трущихся сопряжений. Кроме того, моторное масло является источником информации, как о своем состоянии, так и механизмов и узлов ДВС. Моторное масло в процессе работы ДВС выносит из трущихся сопряжений продукты износа, анализируя которые можно получать информацию о состоянии трибосопряжений.

К методам диагностики ДВС, основанным на анализе продуктов износа моторного масла, можно отнести следующие спектральные методы анализа:

- эмиссионная спектрофотометрия [1];
- атомно-абсорбционная спектроскопия [2, 3];
- атомно-флуоресцентная спектрофотометрия [4-6];
- абсорбционная спектрофотометрия [7];
- оптическая микроскопия [8] и другие.

Перечисленные методы предусматривают использование узкоспециализированного дорогостоящего оборудования, проведение сложных лабораторных исследований, требуют привлечения высококвалифицированных специалистов, что приводит к не-

возможности их использования в условиях предприятий агропромышленного комплекса.

Одним из перспективных методов анализа загрязненности моторного масла работающего ДВС является метод аналитической феррографии, разработанный в конце 60-х годов прошлого столетия [9, 10], который реализуется с использованием специального прибора – феррографа (рис. 1).

Принцип действия феррографа основан на осаждении продуктов износа, содержащихся в моторном масле, под действием высокоградиентного магнитного поля на предметном стекле. Благодаря уклону предметного стекла, частицы располагаются в соответствии со своими размерами – по убыванию, сверху вниз. Феррограмма – это стекло с осажденными и закрепленными на нем частицами (рис. 2).

Исследование феррограмм при помощи оптической и электронной микроскопии позволяет получать информацию о конкретных продуктах износа. По размерам и количеству частиц можно определить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей, по форме частиц – характер износа, по химическому составу частиц – конкретные изнашиваемые детали.

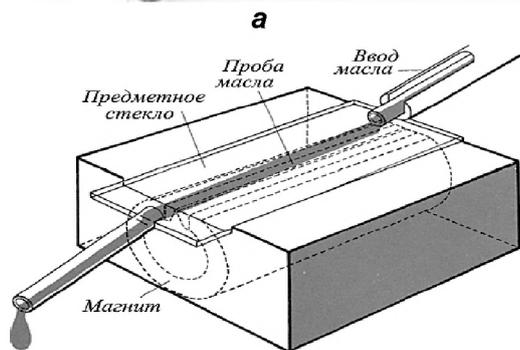
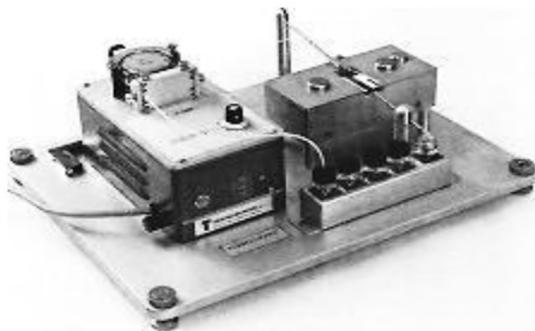


Рисунок 1. Феррограф: а – общий вид;
б – принципиальная схема

Стандартом ASTM D7690 [11] установлены шесть характерных форм частиц износа (рис. 3):
– гладкие пластины (рис. 3а) толщиной до 1 мкм

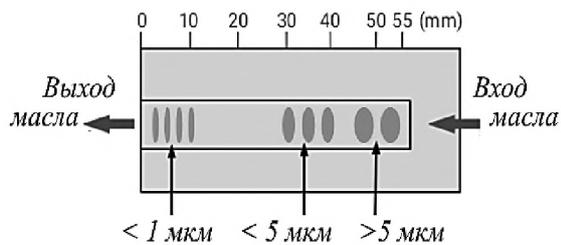
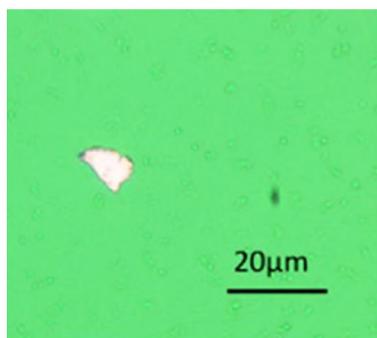


Рисунок 2. Феррограмма, полученная на феррографе линейного типа

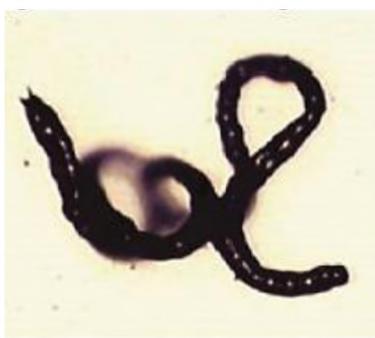
и размером 5–15 мкм, образующиеся в результате нормального изнашивания при скольжении в результате отслаивания;

– стружки (спирали) (рис. 3б) шириной 2–5 мкм и длиной 25–100 мкм, возникающие при абразивном изнашивании (микрорезании) деталей в результате режущего или царапающего действия на них абразивных частиц, находящихся в трибосопряжениях в свободном или закрепленном состоянии. Частицы абразивного износа являются наиболее опасными: повышенное количество крупных частиц (длиной более 50 мкм) приводит к отказу детали механизма;

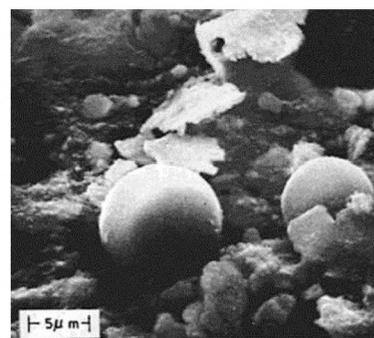
– сферические частицы (рис. 3в) диаметром 1–10 мкм, образующиеся в трещинах подшипников или зацеплениях в результате усталостного изнашивания. По мере развития микротрещин в дорожках качения и шариках подшипников образуются тысячи сферических частиц. При этом один шарик подшипника может сгенерировать до $6,8 \times 10^6$ сферических



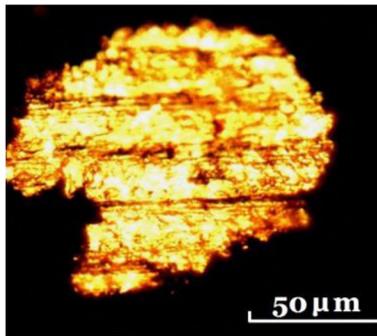
а



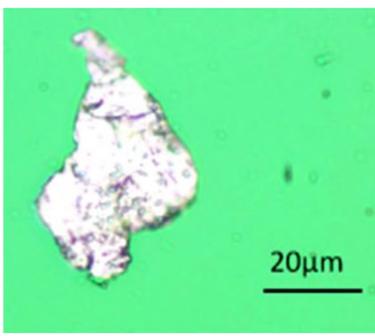
б



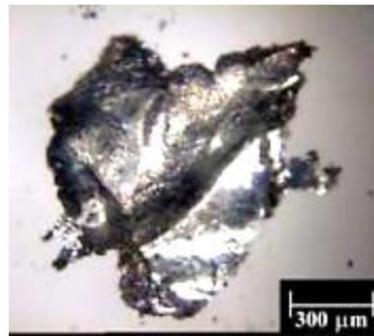
в



г



д



е

Рисунок 3. Формы частицы износа: а – гладкие пластины [12]; б – стружки (спирали) [13]; в – сферические частицы [14]; г – пластины с параллельными бороздками [15]; д – хлопьевидные плоские частицы [12]; е – крупные частицы [16]

частиц перед тем, как он разрушится [10];

– *пластины с параллельными бороздками* на их поверхности (рис. 3г) толщиной до 3 мкм, размером до 200 мкм, являющиеся результатом сильного изнашивания при заедании (задиरे) в условиях скольжения. Наличие таких частиц подтверждает сильный износ деталей, приводящий к отказу механизма в целом;

– *хлопьевидные плоские частицы* (рис. 3д), представляющие собой очень тонкие металлические частицы с отверстиями размером 20–50 мкм. Эти частицы появляются в результате усталостного выкрашивания подшипников качения. Увеличение количества хлопьевидных частиц, наряду со сферическими, свидетельствует о наличии и развитии усталостных микротрещин подшипников качения;

– *крупные частицы износа* (рис. 3е), образующиеся в зубчатых передачах в результате усталостного износа. Такие частицы обычно имеют гладкую поверхность и неправильную геометрическую форму с соотношением длины (ширины) к толщине от 4:1 до 10:1.

Зная из какого материала выполнены детали трибосопряжений двигателя, можно судить об их износе по анализу проб моторного масла. В таблице представлены металлы, из которых изготовлены детали двигателя, и их предельное допустимое количество в моторном масле [17].

Таким образом, при проведении анализа размеров, формы, количества и природы продуктов износа, содержащихся в масле картера двигателя, метод феррографии в конечном итоге позволяет получать своевременную информацию о техническом состоянии деталей двигателя и, при необходимости, провести своевременный ремонт и замену отдельных деталей, предотвращая, тем самым, выход двигателя из строя.

В настоящее время в технически развитых странах для феррографических исследований

широко используется различное оборудование. Например, феррограф *YJF-3 Oil* (Китай) [18], двойной аналитический феррограф масла *YTF-8* (Китай) [19], феррограф *Kittiwake ANALEX rpd FG-K19026-KW* (Великобритания) [20], аналитическая феррографическая лаборатория *SpectroT2FM Q500* (Великобритания) [21] и другое. Стоимость такого оборудования, по данным источника [22], составляет порядка 50 000 долл. США.

В настоящее время сведения о применении феррографии для диагностирования технического состояния ДВС, в том числе автотракторной техники, на территории бывшего Советского Союза отсутствуют.

Цель данной работы – разработать малогабаритный, недорогостоящий аналитический феррограф с возможностью его использования непосредственно в условиях АПК для получения феррограмм и последующего их анализа в лабораторных условиях.

Основная часть

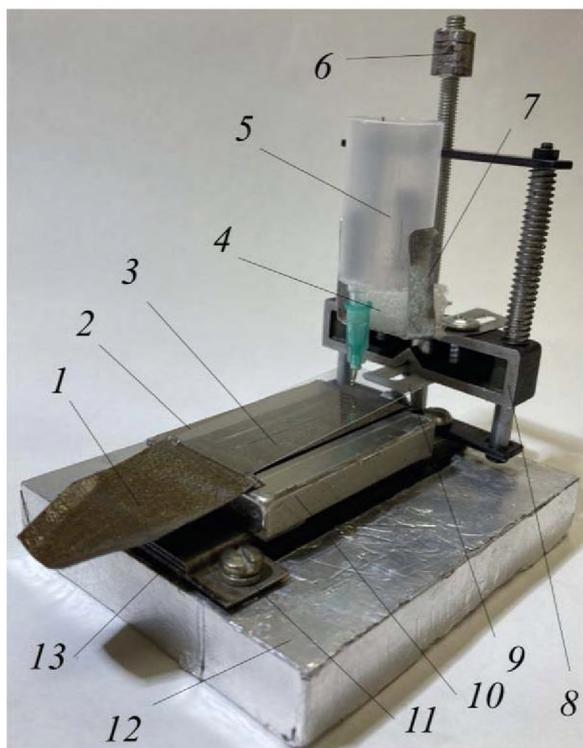
В работе [23] авторами проведены теоретические исследования движения ферромагнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле постоянных магнитов для различных размеров и природы продуктов износа и значений градиента напряженности магнитного поля.

Проведенные теоретические расчеты позволили разработать и создать эффективное магнитное устройство – малогабаритный аналитический феррограф (рис. 4) с магнитной системой с открытой доменной структурой Киттеля для контроля за продуктами износа ДВС.

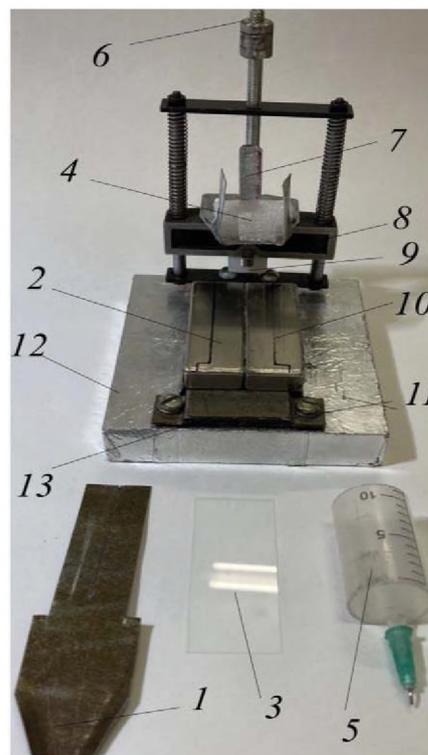
Основными узлами аналитического феррографа являются: рабочее основание 12, выполненное из алюминиевого сплава, на котором размещено «ядро»

Таблица. Металлические продукты износа в моторном масле

Металл	Источник продуктов износа	Предельное допустимое значение, ppm (мг/кг)
Железо	Блок цилиндров, головка блока цилиндров, клапаны, толкатели и направляющие клапанов, коленчатый, распределительный и коромысловый валы, поршневой палец, масляный насос	80-180
Хром	Поршневые кольца, подшипник качения, опора коленчатого вала, выпускные клапаны, уплотнительные элементы, направляющие втулки, режущие подшипники скольжения	4-26
Алюминий	Поршни, режущий блок цилиндров, корпус масляного насоса, масляный радиатор, направляющие втулки, алюминиевые опоры подшипников скольжения	12-55
Медь	Основной компонент латуни и бронзы, масляный насос, масляный радиатор, шатунные подшипники, подшипники поршневого пальца и коромыслового вала, маслостойкие диски	25-60
Свинец	В большинстве случаев вместе с оловом и медью, шатунные подшипники, слой заливки во вкладышах подшипников, присадки, добавленные к маслу	10-30
Олово	В большинстве случаев вместе со свинцом, слой заливки во вкладышах шатунных подшипников, подшипники коромысловых валов и поршневых пальцев, оловосвинцовый припой, места спайки на радиаторе	12-24
Никель	Выпускные клапаны, направляющие клапанов, легирующий компонент высокопрочных зубчатых колес, таких как в случае клапанного распределения или системы распределения в топливном насосе	1-3



а



б

Рисунок 4. Аналитический феррограф: а – в собранном (рабочем) виде; б – рабочие составляющие

13 из двенадцати пластин, изготовленных из магнитомягкого материала (электротехническая сталь), толщиной 0,8 мм каждая. «Ярмо» 13 и подъемный механизм 8 прикреплены к рабочему основанию 12 с помощью четырех болтов 11. Подъемный механизм 8 содержит рамку 9 из полиэтилена для регулировки угла наклона покровного стекла 3 и держатель 7 из тонколистовой оцинкованной стали. В держатель 7 размещается пенополиуретан 4, на который устанавливается дозирующий шприц 5. На «ярмо» 13 устанавливаются два неодимовых магнита 2, 10 марки N 38 с размерами 60×20×10 мм, плотно примыкающих друг к другу, с противоположным направлением направленности магнитного поля. На магнитах 2, 10 размещается пластина 1 из магнитомягкого материала (электротехническая сталь) толщиной 0,8 мм с прорезью шириной 0,6 мм таким образом, чтобы зазор (прорезь) находился непосредственно над верхними кромками сопрягаемых граней магнитов 2, 10. Покровное стекло 3 устанавливается выходной частью на пластину 1, а входной частью – на рамку 9, с возможностью перемещения вверх – вниз при помощи регулировочного винта 6 подъемного механизма 8. Габаритные размеры феррографа – 90×120×120 мм.

Аналитический феррограф работает следующим образом. В пробу испытуемого масла добавляют растворитель (трихлорэтилен) в соотношении 1:1 (1 мл масла, 1 мл растворителя) и тщательно перемешивают. При помощи рамки 9 подъемного механизма 8 устанавливается угол наклона покровного стекла 3, равный 5°. Положение дозирующего шприца 5 в дер-

жателе 7 регулируют таким образом, чтобы расстояние от конца иглы до покровного стекла составляло 2-3 мм. Подготовленный раствор масла и растворителя заливают в дозирующий шприц 5. Выбранное соотношение объемов масла и растворителя, а также установленный угол наклона покровного стекла 3 обеспечивают скорость движения масла по покровному стеклу, равную 0,5 мл/мин. При движении масла частицы загрязнений задерживаются на покровном стекле 3 под действием высокоградиентного магнитного поля, создаваемого предложенной магнитной системой. После пропускания по покровному стеклу 3 всего объема исследуемого раствора, в дозирующий шприц 5 заливают 2-3 мл растворителя (трихлорэтилена), при движении которого по покровному стеклу удаляются остатки масла. Для фиксации осажденных частиц в дозирующий шприц 5 заливают 1 мл перхлорэтилена (тетрахлорэтилен) и пропускают по покровному стеклу 3. Феррограмму (покровное стекло с нанесенными и зафиксированными частицами загрязнений) снимают с феррографа, сушат на воздухе и передают на микроскопическое исследование.

Процесс получения феррограммы моторного масла марки Shell 10W40 с наработкой 250 ч представлен на рисунке 5, а на рисунке 6 – фрагмент полученной феррограммы.

Внешний вид феррограммы моторного масла Лукойл Люкс 10W40 с наработкой 250 ч представлен на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены феррограммы масел

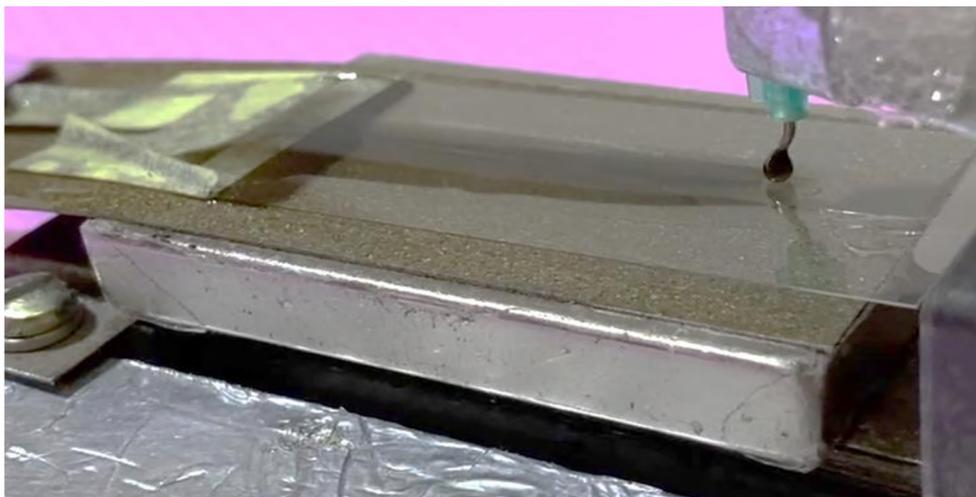


Рисунок 5. Процесс получения феррограммы



Рисунок 6. Фрагмент полученной феррограммы моторного масла Shell 10W40 с наработкой 250 ч

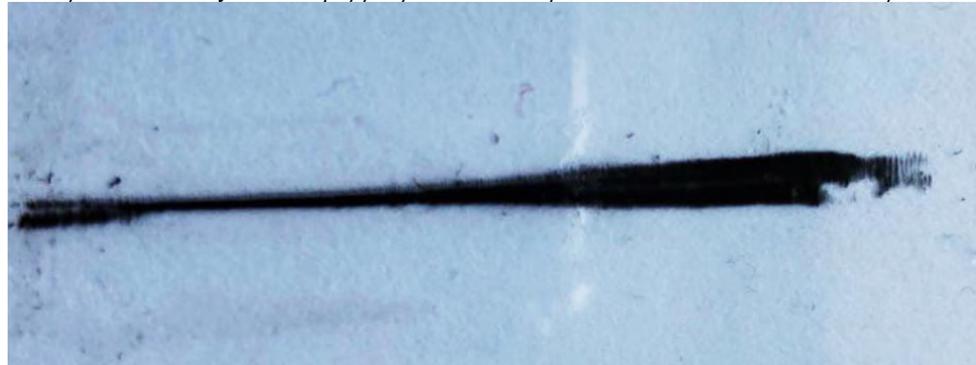


Рисунок 7. Внешний вид феррограммы моторного масла Лукойл Люкс 10W40

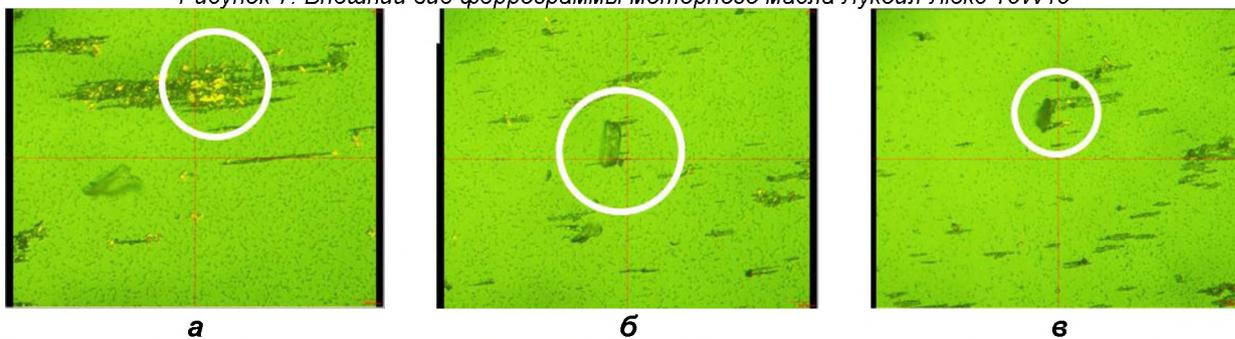


Рисунок 8. Феррограммы масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 100 ч, полученные на инвертированном микроскопе МИ-2Т: а – начало феррограммы; б – середина феррограммы; в – конец феррограммы

Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 100 ч и увеличением 200×, исследованные на инвертированном микроскопе МИ-2Т.

На рисунке 9 представлен фрагмент феррограммы (увеличение 100×) масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 30 ч.

Анализ полученных результатов (рис. 8, 9) пока-

зывает, что даже в моторном масле с небольшой наработкой содержатся частицы износа двигателя с критическими размерами (более 50 мкм), что соответствует переходному режиму смазки со следами схватывания и может свидетельствовать о протекающем процессе изнашивания трибосопряжений ДВС.

Исследование морфологии и химического состава частиц моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч (рис. 10) проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с различным увеличением, а элементный состав фрагмента феррограммы (рис. 11) определяли при помощи микрорентгеноспектрального анализатора фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания).

Проведенные исследования (рис. 10, 11) позволили предположить, что крупные частицы меди являются продуктами усталостного износа трибосопряжений масляного насоса, а частицы коррозионно-стойкой стали – продуктами износа трибосопряжений газораспределительного механизма ДВС.

Заключение

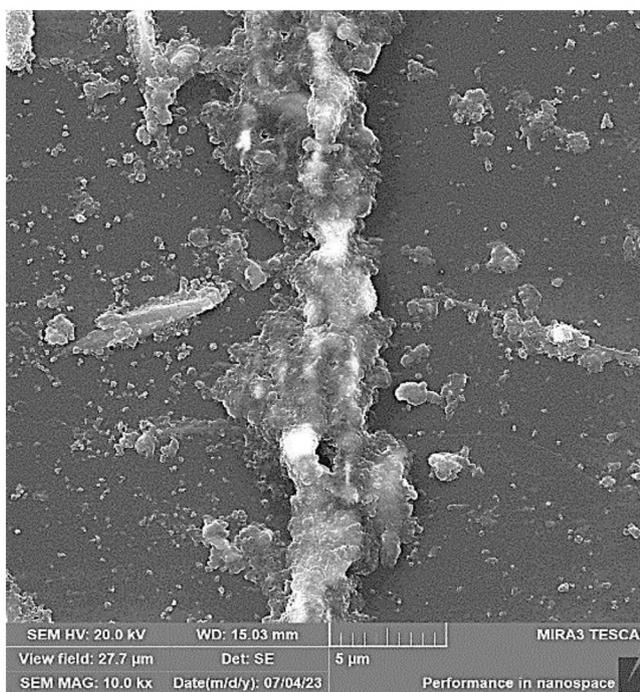
Разработанный феррограф, имеющий невысокую стоимость, небольшую массу и малые габаритные размеры, а также возможность легко разбираться/собираться и транспортироваться, не требующий под-



Рисунок 9. Фрагмент феррограммы масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 30 ч



а



б

Рисунок 10. Фрагмент феррограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч с увеличением: а – 1000×; б – 10000×

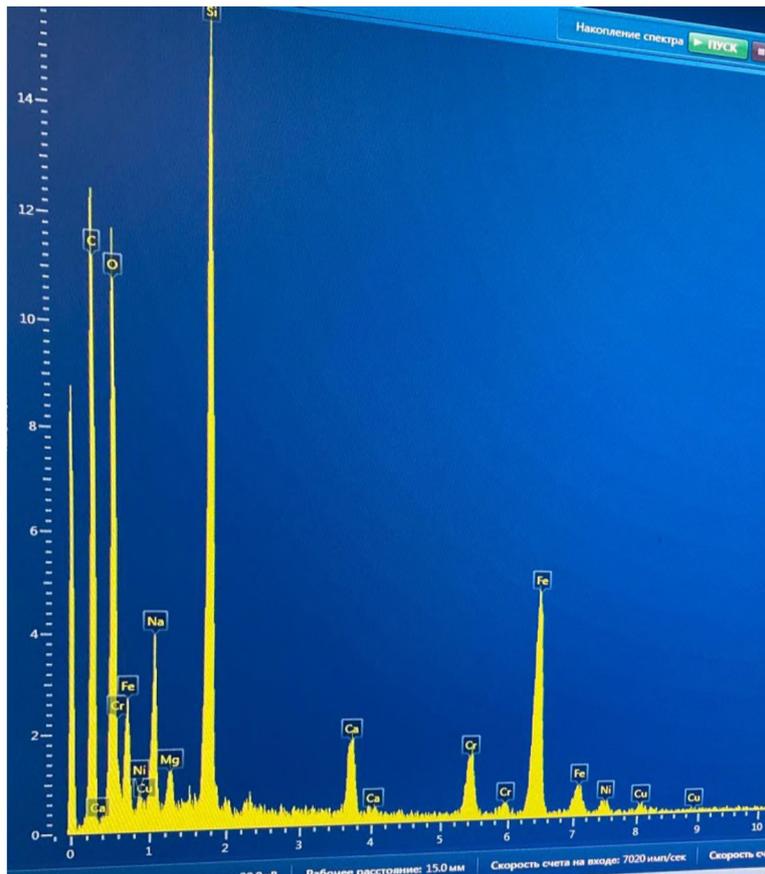


Рисунок 11. Элементный состав фрагмента феррограммы моторного масла Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 150 ч

ключения к электросети, может быть использован в полевых условиях АПК для получения феррограмм. Преимущество данного устройства заключается в том, что, даже не проводя микроскопических исследований, можно визуально или с помощью небольших увеличений (лупа, полевой микроскоп) качественно оценить степень загрязненности моторного масла продуктами износа трибосопряжений ДВС. Однако для детального анализа феррограмм (размеры, форма, природа и количество частиц износа) необходимо применение высокоточного оборудования (микроскопы с большим увеличением) и, во многих случаях, привлечение высококвалифицированных специалистов, что возможно осуществлять только в лабораторных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hansen, T. Determination of iron in used lubricating oils by spectrochemical analysis / T. Hansen, P. Skiba, C.R. Hodkins // Analytical Chemistry. – 1951. – № 23 (10). – P. 1362-1365.
2. Lukas, M. Current technology in oil analysis spectrometers and what we may expect in the future / M. Lukas, R.J. Yurko // Integrated monitoring, diagnostics and

failure prevention: In Proceedings of a Joint Conference. – Mobile, Alabama, 1996. – P. 161-171.

3. Levinsohn, H. Limitations of atomic absorption spectrophotometry applied to spectrometric oil analysis / H. Levinsohn // ASLE Transactions. – 1984. – № 27 (1). – P. 24-32.

4. Cumming, G. The determination of iron in lubricating oil by X-ray fluorescence spectrometry / G. Cumming, I.G. McDonald // Wear. – 1985. – № 103 (1). – P. 57-66.

5. Berg, J.L. Lubricant testing as an oil to bearing damage analysis / J.L. Berg, J.E. Lieser // Lubrication Engineers. – 1973. – № 29 (12). – P. 539-543.

6. Yang, Z. Determination of wear metals in engine oil by mild acid digestion and energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry using solid phase extraction disks / Z. Yang, X. Hou, B.T. Jones // Talanta. – 2003. – № 59 (4). – P. 673-680.

7. Severin, D. Zur Mesung von motoren olverschmutzung / D. Severin [et al.] // Schmierungstechnik + Tribologie. – 1981. – № 28 (3). – P. 87-88.

8. Reda, A.A. Characteristics of particles generated at the interface between sliding steel surfaces / A.A. Reda, R. Bowen, V.C. Westcott // Wear. – 1975. – № 34 (3). – P. 261-273.

9. Seifert, W.W. A method for the study of wear particles in lubricating oil / W.W. Seifert, V.C. Westcott // Wear. – 1972. – Vol. 21. – P. 27-42.

10. Westcott, V. Ferrographic Oil and Grease Analysis as Applied to Earthmoving Machinery / V. Westcott // SAE Technical Paper 750555. – 1975.

11. Standard Practice for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants by Analytical Ferrography: ASTM D7690 –11. – ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2011. – 12 p.

12. Wang, S. Integrated model of BP neural network and CNN algorithm for automatic wear debris classification / S. Wang [et al.] // Wear. – 2019. – № 426-427. – P. 1761-1770.

13. Hong, W. Mechanical wear debris feature, detection and diagnosis: A review / W. Hong [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. – 2018. – № 31 (5). – P. 867-882.

14. Scott, D. Ferrography – an advanced design aid for the 80's / D. Scott, W. W. Seifert, V.C. Westcott // Wear. – 1975. – № 34 (3). – P. 251-260.

15. Upadhyay, R.K. Microscopic technique to determine various wear modes of used engine oil / R.K. Upadhyay // Journal of Microscopy and Ultrastructure. – 2013. – № 1 (3). – P. 111-114.

16. Raadnui, S. Wear particle analysis – utilization of quantitative computer image analysis: A review /

S. Raadnui // Tribology International. – 2005. – № 38 (10). – P. 871-878.

17. Металлы в отработанном моторном масле. Сколько считать нормой? // Гараж 504/507 [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://504507.ru/garage/oiltest/13-mctally-v-otrabotannom-motomom-masle-skolko-schitat-normoj.html>. – Дата доступа: 14.07.2023.

18. YJF-3 Thistle Tube Oil Analytical Ferrography / yateks® [Electronic resource]. – 2023. – Mode of access: <https://yateks.com/product/oil-analytical-ferrography/>. – Date of access: 12.07.2023.

19. YTF-8 Dual Slide Analytical Ferrography / yateks® [Electronic resource]. – 2023. – Mode of access: <https://yateks.com/product/dual-slide-analytical-ferrography/>. – Date of access: 12.07.2023.

20. ANALEX_RPD – Rotary Particle Depositor | #FG-K19026-KW / Parker [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://ph.parker.com/us/en/analex-rpd-rotary-particle-depositor/fg-k19026-kw>. – Date of access: 15.08.2021.

21. SpectroT2FM Q500 Analytical Ferrography Laboratory / SciMED™ [Electronic resource]. – 2023. – Mode of access: <https://www.scimed.co.uk/product/spectrot2fm-q500-analytical-ferrography-laboratory/>. – Date of access: 12.07.2023.

22. Белов, В.В. Экспресс-методика диагностирования износа механизмов двигателя / В.В. Белов, А.Р. Ваймер // Грузовик, 2009. – № 12. – С. 18-21.

23. Осаждение ферромагнитных частиц в поле постоянных магнитов / В.К. Корнеева [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 5 (153). – С. 34-39.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.07.2023

УДК 339.5

<https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-158-4-33-38>

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ON-LINE ТОРГОВЛИ АГРАРНОЙ ПРОДУКЦИЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

К.В. Борель,

ассистент каф. управления БГСХА, магистр экон. наук

В статье проанализированы системы сбыта аграрной продукции и модели электронной коммерции при продвижении товаров на внутренний и внешний рынок. Разработана стратегия развития on-line торговли аграрной продукцией в Республике Беларусь, базирующаяся на системе целей по методу SMART. Обоснован комплекс приоритетных направлений, предусматривающих создание сайта-агрегатора и мобильного приложения по продаже продукции на макроуровне, а также развитие собственного Интернет-магазина организации и расширение сотрудничества с электронными торговыми площадками на основе CRM-системы.

Ключевые слова: стратегия, on-line торговля, производственно-сбытовая система, электронная торговля, модель, эффективность.

The article analyzes the agrarian products sales systems and e-commerce models of product promotion in the national and foreign markets. The strategy of on-line trade development of agricultural production in the Republic of Belarus, based on the SMART goal system, has been developed. A set of priority directions was substantiated, providing the creation of the site-aggregator and the mobile application for the products sales at macro level, as well as the development of the company's Internet-shop and the cooperation expansion with electronic trade platforms based on CRM-system.

Key words: strategy, on-line trade, value chain, e-commerce, model, efficiency.

Введение

Инновационное развитие мировой и национальной экономики определяет новые направления функционирования производственно-сбытовой системы (ПСС). Согласно теоретическим исследованиям В.Г. Гусакова, Л.Н. Байгот, В.И. Бельского, В.И. Буця, З.М. Ильиной, Н.В. Киреенко, В.А. Ключача, Л.В. Пакуш и на основе изучения зарубежного опыта, в практике аграрной сферы выделяются следующие системы сбыта продукции [1-9]:

1) кооперативные, представленные контракцией

(заключение договора между фермерами и предприятиями-интеграторами на производство и сбыт определенных видов продукции) и кооперацией (реализуются в виде горизонтальной и вертикальной кооперации);

2) оптово-посреднические, включающие оптовую торговлю, товарные биржи, выставки и ярмарки, аукционную торговлю, оптовые продовольственные рынки, распределительные центры, специализированные оптовые компании, мелкооптовые магазины-склады;

3) розничные и корпоративные, включающие розничную и фирменную торговлю, корпоративную торговую сеть, общественное питание.