

5. Mihalache D. et al. The use of drones in modern agriculture/ D. Mihalache et al. // Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series. – 2021. – Т. 50. – № 2. – С. 349-354.

6. Browning D. et al. Monitoring agroecosystem productivity and phenology at a national scale: A metric assessment framework / D. Browning et al. // Ecological Indicators. – 2021. – Т. 131. – № 1. – С. 18-35.

7. Top 5 Newest Technologies In Agriculture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eos.com/blog/top-5-newest-technologies-in-agriculture/>

8. Романова, Л.В. Инновации в АПК в условиях цифровизации/ Л.В. Романова, О.Н. Фочкина // Современные цифровые технологии в агропромышленном комплексе. – 2020. – № 1. – С. 241-244.

9. Кошенкова, У.В. Тенденции развития производства продукции сельского хозяйства в РФ/ У.В. Кошенкова, Л.В. Черкашина // Актуальные вопросы современной аграрной экономики. – 2020. – № 1. – С. 49-55.

10. Есенин, М. А. К вопросу использования беспилотных летательных аппаратов в технологиях утилизации незерновой части урожая в качестве удобрения/ М. А. Есенин, И. Ю. Богданчиков, А. Н. Бачурин // Материалы Всероссийской национальной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию со дня рождения профессора Анатолия Михайловича Лопатина, Рязань, 12–13 ноября 2019 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. – С. 88-94.

УДК 621.436.038

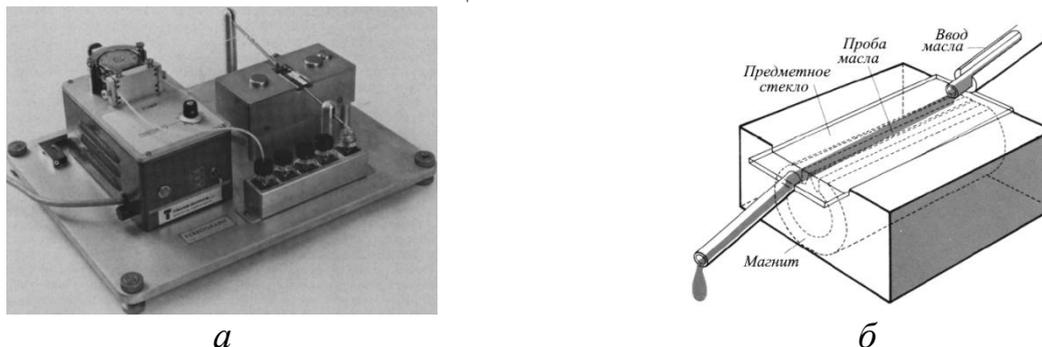
*Рыхлик А.Н.,
Корнеева В.К., к.т.н.,
Капцевич В.М., д.т.н.
УО БГАТУ, г. Минск, РБ*

ФЕРРОГРАФИЯ – ОТ ИСТОКОВ К СОВРЕМЕННОСТИ

Феррография – метод анализа продуктов износа, содержащихся в различных смазочных материалах (моторные и гидравлические масла, консистентные смазки). Он заключается в магнитном осаждении частиц износа, обладающих магнитными свойствами, на предметном стекле под действием высокоградиентного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Благодаря уклону предметного стекла, частицы располагаются в соответствии со своими размерами – по убыванию, сверху вниз. Стекло, с осажденными и закрепленными на ней частицами, называется феррограммой.

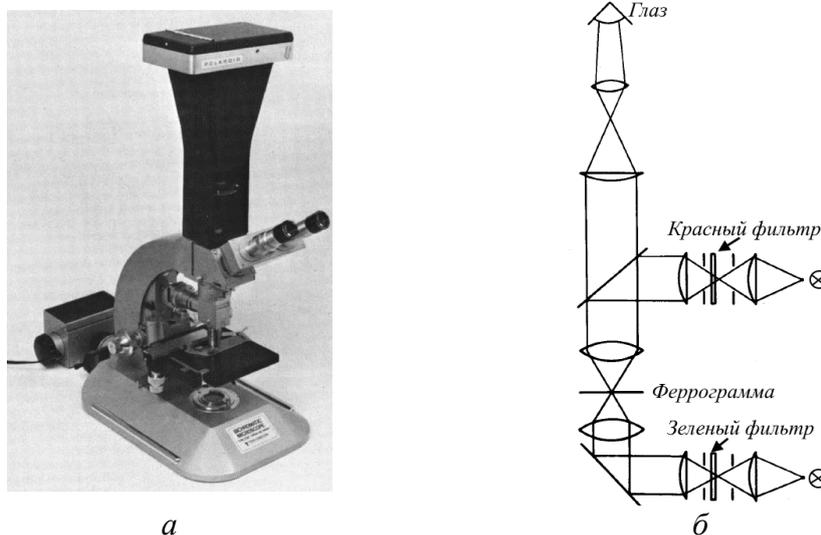
Впервые, феррография была представлена научному сообществу *W.W. Seifert* и *V.C. Westcott* в 1972 г [1]. Разработанный ими феррограф с линейной системой осаждения продуктов загрязнения (рис. 1) состоял из постоянного магнита, создающего высокоградиентное магнитное поле, насоса, подающего разбавленное смазочное масла с постоянной скоростью 0,25

мл³/мин; и предметного стекла, расположенного под углом 1°, на котором осаждаются намагниченные частицы.



a – внешний вид; *б* – принципиальная схема
Рисунок 1 – Феррограф W.W. Seifert и V.C. Westcott

Для анализа частиц износа, расположенных на феррограмме, W.W. Seifert и V.C. Westcott был разработан бихроматический микроскоп – ферроскоп (рисунок 2) [1], который сочетает в себе функции как биологического, так и металлографического микроскопов. В таком оборудовании используются источники отраженного и проходящего света, которые можно использовать одновременно. В процессе исследования металлических и неметаллических частиц в ферроскопе предусмотрено использование зеленого фильтра на пути проходящего света и красного – на пути отраженного (рисунок 2, б). При таком бихроматическом освещении металлические частицы, отражающие свет, выглядят ярко-красными, а неметаллические, пропускающие свет – зелеными.



a – внешний вид; *б* – оптическая схема
Рисунок 2 – Бихроматический микроскоп

Для увеличения производительности проведения исследований V.C. Westcott разработал сдвоенный феррограф (рисунок 3) [2], позволяющий получать две феррограммы одновременно и проводить их сравнительный анализ.

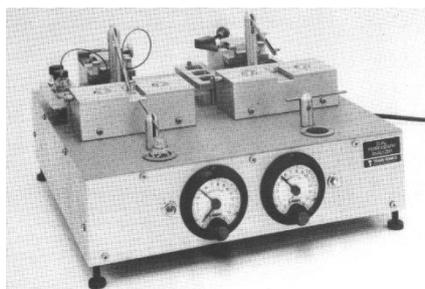
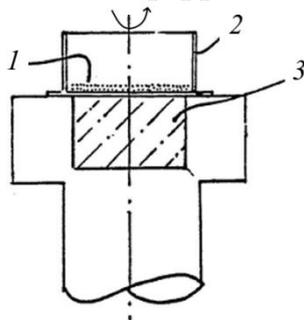


Рисунок 3 – Сдвоенный феррограф

Принципиальная схема аналитического феррографа с вращающейся системой осаждения продуктов загрязнений, разработанного группой ученых Трибологического центра *Swansea* (Великобритания), представлена на рисунке 4 [3]. Прибор работает следующим образом. Порция масла подается в центр вращающегося предметного стекла 2, расположенного над магнитом 3. Под действием магнитной и центробежной силы частицы осаждаются на предметном стекле 1 по концентрическим окружностям. Затем полученная феррограмма исследуется при помощи ферроскопа.



1 – предметное стекло; 2 – вращающийся стол; 3 – постоянный магнит

Рисунок 4 – Принципиальная схема вращающегося феррографа

В технически развитых странах в последние десятилетия создавалась сервисная сеть лабораторий, оснащенных новым феррографическим оборудованием, позволяющим производить анализ частиц износа, присутствующих в моторном масле, по размерам и количеству которых можно определить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей, по форме частиц – характер износа, по химическому составу частиц – конкретные изнашиваемые детали.

Так, разработанный аналитический феррограф *YJF-3 Oil* (Китай) (рисунок 5) [4] с линейной системой осаждения продуктов износа используется для контроля качества моторного, гидравлического и трансмиссионного масел. Максимальный градиент магнитного поля феррографа составляет более 5,0 Т/см, угол феррограммы устанавливается равным 2°, 3°, 4°. Двойной аналитический феррограф масла *YTF-8* (Китай) (рисунок 6) [5] с линейной системой осаждения продуктов износа позволяет одновременно получать две феррограммы. С помощью системы управления феррографическим программным обеспечением можно создать базу данных анализа феррограмм. Феррограф позволяет регулировать скорость потока пробы масла, тем самым

обеспечивает равномерное осаждение частиц по длине феррограммы. Продолжительность изготовления феррограмм составляет менее 20 мин. Частицы сортируются по магнитной восприимчивости и размеру, что позволяет быстро их интерпретировать. Аналитический феррограф *Kittiwake ANALEXrpdFG-K19026-KW* (Великобритания) (рис. 7) [6] с вращающейся системой осаждения продуктов износа в поле магнитных, центробежных и гравитационных сил позволяет получить феррограмму в виде концентрически расположенных окружностей.



Рисунок 5 – Аналитический феррограф YJF-3 Oil



Рисунок 6 – Двойной аналитический феррограф масла YTF-8



Рисунок 7 – Аналитический феррограф *Kittiwake ANALEXrpdFG-K19026-KW*

В настоящее время разработаны современные феррографические микроскопы (рисунок 8). Так, бихроматический феррографический микроскоп *MT8100F* (США) (рисунок 8, а) [7] оборудован камерой и предназначен для исследования феррограмм, полученных на аналитическом феррографе, в поляризованном или бихроматическом (красном и зеленом) цвете. Общее увеличение ферроскопа составляет 50×, 100×, 200× и 500×. В комплект ферроскопа входит камера *CMOS* (3 Мп) с программным обеспечением, позволяющим фотографировать и сохранять изображения, а также проводить их измерение. Аналитический ферроскоп *FS-6* (США) (рисунок 8, б) [8] специально разработан компанией *Trico* с приставками и опциями, которые улучшают идентификацию и интерпретацию частиц износа. Ферроскоп *FS-6* имеет три увеличения: 100×, 500×, 1 000×. Специалист может быстро отсканировать феррограмму при малом увеличении в поисках очевидных аномальных частиц износа, интерпретировать происхождение частиц и механизм износа при 500-кратном увеличении и получить более полное представление о характере износа при 1000-кратном увеличении. Ферроскоп *FS-6* оснащен источниками отражающего и проходящего света, что позволяет освещать феррограмму сверху и снизу. Красный источник света над феррограммой заставляет свет отражаться от частиц, а зеленый под

феррограммой вызывает передачу света. Любые металлические частицы будут отражать свет, а неметаллические частицы будут пропускать свет и казаться прозрачными.



а



б

а – MT8100F; б – FS-6

Рисунок 8 – Бихроматические ферроскопы

Аналитическая феррографическая лаборатория Spectro T2FMQ500 (Великобритания) (рисунок 9) [9] – это комплексный аналитический инструмент для отделения и анализа частиц износа и загрязнений в отработанных смазочных маслах, охлаждающих жидкостях, гидравлических жидкостях и топливе. Лаборатория включает в себя устройство феррограф T2FM для изготовления феррограмм, видеокамеру, бихроматический микроскоп и программное обеспечение для анализа изображений.



Рисунок 9 – Аналитическая феррографическая лаборатория SpectroT2FMQ500

Библиографический список

1. 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.
2. Westcott, V. Ferrographic Oil and Grease Analysis as Applied to Earthmoving Machinery/ V. Westcott // *SAE Technical Paper 750555*. – 1975.
3. Patent WO85/04715. Method and apparatus for assessing particle deposits / Inventors: A.R. Lansdown, D.B. Jones, A.L. Price – № 85/04715; patented Oct. 24, 1985. – PCT.
4. YJF-3 Thistle Tube Oil Analytical Ferrography / yateks® [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://yateks.com/product/oil-analytical-ferrography/>. – Date of access: 15.08.2021.
5. YTF-8 Dual Slide Analytical Ferrography / yateks® [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://yateks.com/product/dual-slide-analytical-ferrography/>. – Date of access: 15.08.2021.
6. 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.
7. Bichromatic Ferrographic Microscope / MicroscopeWorld [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://www.microscopeworld.com/p-958-bichromatic-ferrographic-microscope.aspx>. – Date of access: 15.08.2021.
8. Ferroscope – Wear Debris Analysis (Ferrography) / Trico [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://www.tricocorp.com/product/ferroscope/>. – Date of access: 15.08.2021.
9. Spectro T2FMQ500 Analytical Ferrography Laboratory / SciMED™ [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://www.scimed.co.uk/product/spectrot2fm-q500-analytical-ferrography-laboratory/>. – Date of access: 15.08.2021.
10. Диагностирование состояния системы смазки автомобильных двигателей/ Г.К. Рембалович, М.Ю. Костенко, А.В. Старунский, И.В. Исаев // *Вестник Совета молодых ученых РГАТУ*. – 2018. – № 2 (7). – С. 78-83.