

МЕМБРАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ – ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАЛИЧИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В МОТОРНОМ МАСЛЕ РАБОТАЮЩЕГО 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

П.М. Спиридович,

аспирант каф. технологии металлов БГАТУ

В.В. Остриков,

магистрант каф. технологии металлов БГАТУ

В статье приведена методика и оборудование для осуществления метода мембранной фильтрации моторного масла работающего ДВС в условиях агропромышленного комплекса (АПК). На примере моторных масел с различной наработкой показано, что этот метод может быть использован при оценке размеров и количества частиц загрязнений, на основании которой можно судить о характере процесса изнашивания трибосопряжений в процессе работы ДВС.

Ключевые слова: моторное масло, мембранная фильтрация, фильтрограмма, размеры механических примесей, ДВС, процессы изнашивания.

The methodology and equipment for implementing the method of membrane filtration of motor oil of an operating internal combustion engine under agricultural conditions are presented. Using the example of motor oils with different operating hours, it is shown that this method can be used to assess the size and number of contaminant particles, on the basis of which one can judge the nature of the wear process of friction unit during the operation of the internal combustion engine.

Key words: motor oil, membrane filtration, filtergram, sizes of mechanical impurities, internal combustion engine, wear processes.

Введение

Моторное масло, как конструкционный элемент двигателя внутреннего сгорания (ДВС), является носителем информации о состоянии самого масла и о работоспособности двигателя и его систем. В процессе работы ДВС под воздействием высоких температур и давлений, при контактировании с металлическими поверхностями, водой, топливом и воздухом в моторном масле происходит процесс непрерывного накопления загрязнений (рис. 1). Этот процесс приводит к постепенному ухудшению и потере необходимых эксплуатационных свойств моторного масла, что в свою очередь отрицательно сказывается на работоспособности узлов и агрегатов ДВС и ведет к преждевременному износу ответственных и дорогостоящих деталей.

По своему отрицательному воздействию наиболее опасными загрязнениями, влияющими как на состояние самого масла, так и на работу двигателя, яв-

ляются абразивные частицы и продукты износа ДВС. Так, появление абразивных частиц в моторном масле может свидетельствовать о возможных неисправностях в системе воздухоочистки, а попадание продуктов износа, возрастание их количества и размеров – о возникновении негативных процессов в трибосопряжениях ДВС. Контролируя генерирование продуктов износа в моторном масле и определяя при этом размеры частиц, можно характеризовать процесс изнашивания трибосопряжений ДВС следующим образом [1, 2]: наличие частиц износа размером до 10 мкм характеризует процесс нормального изнашивания; до 100 мкм – сильного изнашивания; 100–1000 мкм – предаварийного изнашивания; более 1000 мкм – катастрофического изнашивания (рис. 2).

Кроме того, определяя количество таких частиц, их форму и химический состав, можно оценить интенсивность изнашивания рабочих поверхностей деталей [3], характер износа [4] и конкретные изнашиваемые детали [5].

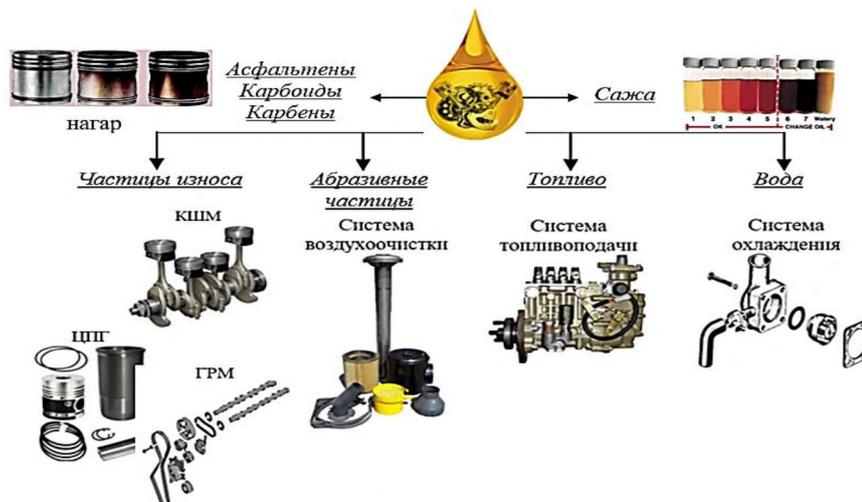


Рисунок 1. Пути попадания загрязнений в моторное масло

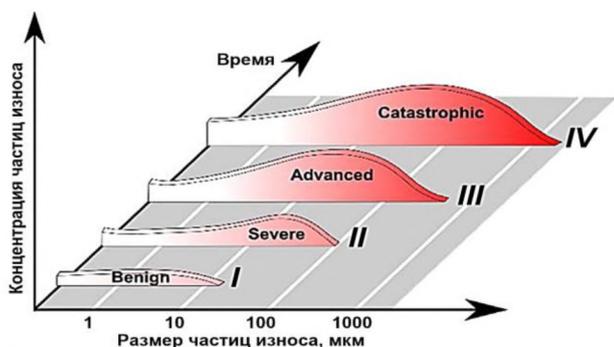


Рисунок 2. Виды процессов изнашивания трибосо-пряжений ДВС: I – нормальное изнашивание; II – сильное изнашивание; III – предаварийное изнашивание; IV – катастрофическое изнашивание [2]

Одним из методов контроля присутствия абразивных частиц и продуктов износа ДВС в моторном масле является метод мембранной фильтрации, позволяющий наглядно контролировать их наличие и при этом оценивать размеры и количество.

Метод мембранной фильтрации широко применя-

ется при проведении исследований в химии, биохимии, микробиологии, медицине и пищевой промышленности. В зарубежных странах он получил название – «патч-тестирование» (*Patch Test*) и применяется также для анализа продуктов загрязнений топлива, смазочных материалов и других технических жидкостей. Для реализации данного метода разработаны различные стандарты, в которых описаны методики определения следующих показателей качества исследуемых технических жидкостей: общей загрязненности нерастворимыми механическими примесями гравиметрическим методом [6, 7], размера частиц, их количества и класса чистоты жидкости [8-10], а также формы и источника происхождения механических примесей микроскопическими методами [4].

Для реализации метода мембранной фильтрации при анализе технических жидкостей непосредственно в условиях предприятий используются различные портативные средства и мини-лаборатории. На рисунке 3 представлены – комплект для патч-тестирования *Filtertechnik* (Великобритания) [11] (рис. 3а) и портативный комплект для анализа жидкостей *Donaldson* (США) [12] (рис. 3б), позволяющие опре-



а



б

Рисунок 3. Комплекты для патч-тестирования технических жидкостей: а – фирмы *Filtertechnik*; б – фирмы *Donaldson*

делить основные типы частиц загрязнений, оценить их количество, размеры и форму.

Такие комплекты для патч-тестирования могут быть использованы в условиях АПК, однако в странах СНГ до настоящего времени подобные портативные средства для проведения непосредственно анализа моторного масла отсутствуют, а сам метод мембранной фильтрации остается нереализованным и неизученным.

Метод мембранной фильтрации моторного масла работающего ДВС заключается в вакуумной фильтрации масла через мембрану с последующим анализом осажденных на ней частиц загрязнений [13]. Мембрана с осажденными частицами загрязнений получила название – фильтрограмма. Анализ фильтрограмм осуществляется визуальным осмотром (невооруженным глазом или при небольших увеличениях при помощи лупы), а также с использованием оптических микроскопов [13]. Эти методы позволяют оценить химическую природу частиц загрязнений, определить их форму, количество и размеры.

Цель работы – показать возможность использования метода мембранной фильтрации для оценки размеров и количества механических примесей в моторном масле, позволяющей характеризовать процесс изнашивания трибосопряжений работающего ДВС в условиях АПК.

Основная часть

Оценку размеров и количества частиц загрязнений методом мембранной фильтрации осуществляли на примере работающих моторных масел Лукойл Авангард 10W40 и Shell Rimula 10W40 с различной наработкой часов. Масла были собраны из ДВС Д-260.4S2 и Deutz Common Rail тракторов БЕЛАРУС – 2022.3 и БЕЛАРУС – 3522 во время проведения весенних полевых работ 2022-2023 гг. в ПРУП «Экспериментальная база им. Котовского».

В качестве мембран при проведении исследований использовали фильтрующие мембраны диаметром 47 мм из ацетата целлюлозы марки МФАС-НВ

(ТУ 22.21.41-018-43153636-2017) с размерами пор 0,8-0,9 мкм (ЗАО НТЦ «Владипор», РФ). Исследования поровой структуры мембраны, проведенные при помощи сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения MIRA 3 («Tescan», Чехия) с обеих ее сторон (рис. 4, 5), показали, что она является асимметричной, так как имеет различные размеры пор с противоположных сторон. Установлено, что поверхность нижней стороны мембраны (рис. 4а, 5) характеризуется размерами пор 1,0-3,0 мкм и равномерным их распределением по поверхности. В свою очередь, на поверхности верхней стороны (рис. 4б) поры распределены неравномерно, их размеры находятся в диапазоне 2-20 мкм. Проведенные исследования позволили обосновать выбор нижней стороны мембраны в качестве фильтрующей, на которой можно реализовать осаждение частиц загрязнений, присутствующих в моторном масле (3,0 мкм и более).

Для получения фильтрограмм методом мембранной фильтрации разработана и изготовлена установка (рис. 6), позволяющая организациям АПК проводить исследования в полевых условиях.

В установке мембранной фильтрации (рис. 6) использовали воронку (рис. 6б) с выходным отверстием 10 мм и концентрирующую прокладку (рис. 6в) с центральным отверстием диаметром 3 мм, позволяющую ограничить осаждение частиц загрязнений при фильтровании моторного масла на рабочем участке мембраны диаметром 3 мм. Такое конструктивное исполнение установки мембранной фильтрации позволило упростить проведение дальнейших микроскопических исследований частиц загрязнений на фильтрограммах.

Процесс получения фильтрограмм осуществляли следующим образом. Пробу масла (1 см³) предварительно тщательно перемешивали с растворителем (20 см³). Концентрирующую прокладку устанавливали в фильтродержателе, на ней размещали мембрану и устанавливали воронку. Пробу разбавленного растворителем моторного масла пропускали через мембрану с помощью ручного вакуумного насоса. Допол-

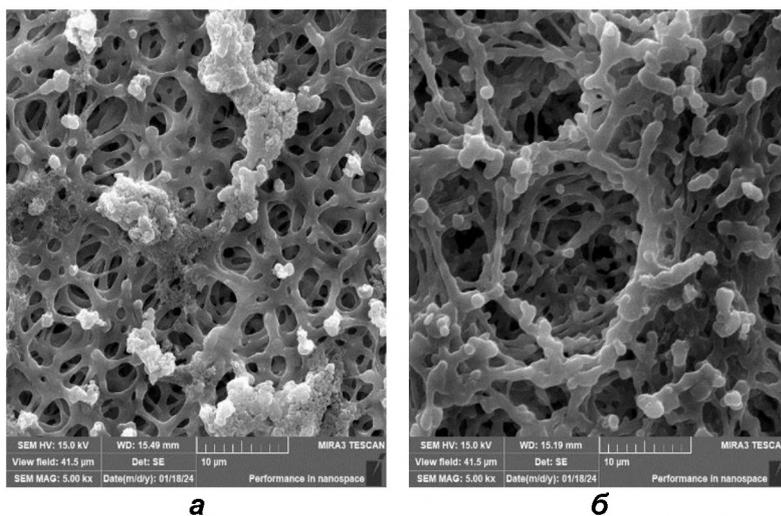


Рисунок 4. Микроструктуры мембраны при увеличении 5 000×: а – нижняя сторона; б – верхняя сторона

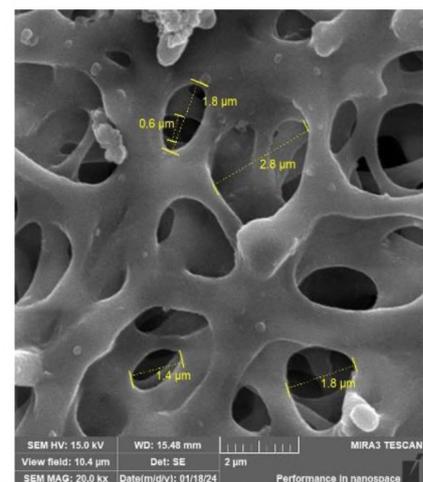


Рисунок 5. Микроструктура мембраны (нижняя сторона) при увеличении 20 000×

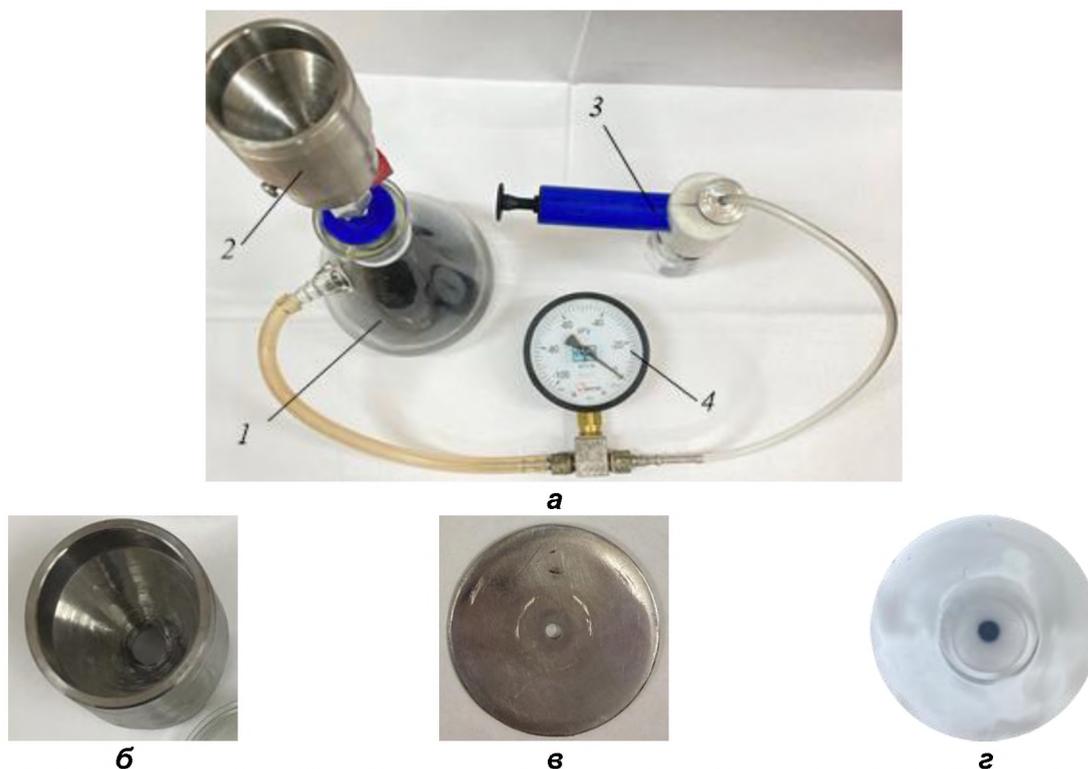


Рисунок 6. Установка мембранной фильтрации для полевых испытаний: а – внешний вид (1 – колба Бунзена; 2 – фильтрующая воронка с фильтродержателем и концентрирующей прокладкой; 3 – ручной вакуумный насос; 4 – вакуумметр); б – фильтрующая воронка; в – концентрирующая прокладка; г – полученная фильтрограмма

нительно через мембрану пропускали 20 см³ растворителя с целью удаления сажистых частиц и продуктов окисления моторного масла. Для окончательного получения фильтрограммы (рис. 6г) мембрану с осажденными на ней частицами загрязнений сушили в течение 20 мин.

Для анализа частиц загрязнений на фильтрограмме использовали оборудование, позволяющее осуществлять микроанализ непосредственно в условиях АПК (рис. 7):

- микроскоп отсчетного типа МПБ-2 (поле зрения – 8,5 мм при увеличении 24×);
- портативный цифровой микроскоп *Discovery Artisan 32* (увеличение 10–300×), подключенный к ноутбуку с возможностью фиксации изображения на экране;
- беззеркальный фотоаппарата *Canon EOS M50 Mark II* с объективом для макросъемки *Tokina ATX-I 100MM F2.8 FF Macro*.

Полученные изображения рабочего участка фильтрограммы (3 мм) с помощью микроскопа МПБ-2 и мобильного телефона представлены на рисунке 8.

Анализ полученных фильтрограмм (рис. 8) показывает, что во всех исследуемых маслах присутствуют частицы механических примесей (50 мкм и более), а также мелкие частицы в значительном количестве, причем с увеличением наработки масла количество мелких и крупных частиц увеличивается.

Фотографии рабочих участков фильтрограмм рассматриваемых масел Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой, полученные с помощью портативного цифрового микроскопа *Discovery Artisan 32*, представлены на рисунке 9. Результаты исследований аналогичны результатам, полученным с помощью микроскопа МПБ-2 (рис. 8).

Наличие частиц износа в моторных маслах свидетельствует о характере процесса изнашивания в трибосопряжениях ДВС. Так, присутствие частиц износа с размерами 10-100 мкм в моторных маслах марки Лукойл Авангард 10W40 с наработкой 30 и 100 ч свидетельствует о протекании процесса сильного изнашивания, а в масле с наработкой 150 ч, в котором присутствуют частицы размером более 100 мкм – о возможном протекании процесса предаварийного изнашивания.

На рисунке 10 представлены фотографии рабочих участков фильтрограмм моторного масла марки *Shell Rimula 10W40* с различной наработкой, полученные с использованием беззеркального фотоаппарата *Canon EOS M50 Mark II* с объективом для макросъемки *Tokina ATX-I*.

Результаты исследований (рис. 10), полученные с использованием макросъемки, показывают, что частицы загрязнений на фильтрограммах имеют четкое объемное цветное изображение, что позволяет оценить не только их размеры и форму, но и ориентировочно определить по цвету химическую природу.



а



б

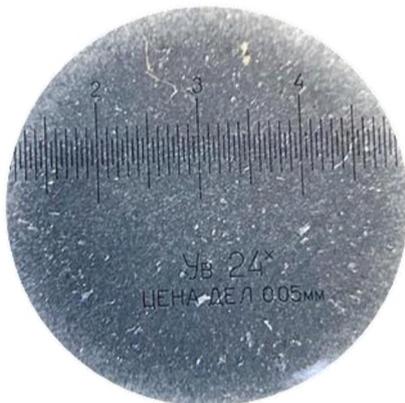


в



г

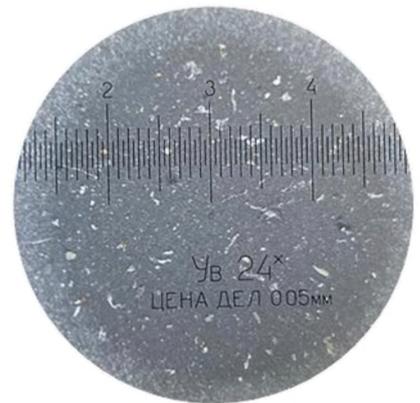
Рисунок 7. Оборудование для микроанализа: а – микроскоп отсчетного типа МГБ-2; б – портативный цифровой микроскоп Discovery Artisan 32, подключенный к ноутбуку; в – беззеркальный фотоаппарат Canon EOS M50 Mark II; г – объектив для макросъемки Tokina ATX-I 100MM F2.8 FF Macro



а



б



в

Рисунок 8. Изображения рабочего участка фильтрограмм моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой, полученные с помощью микроскопа МГБ-2 и мобильного телефона:
а – 30 ч; б – 100 ч; в – 150 ч

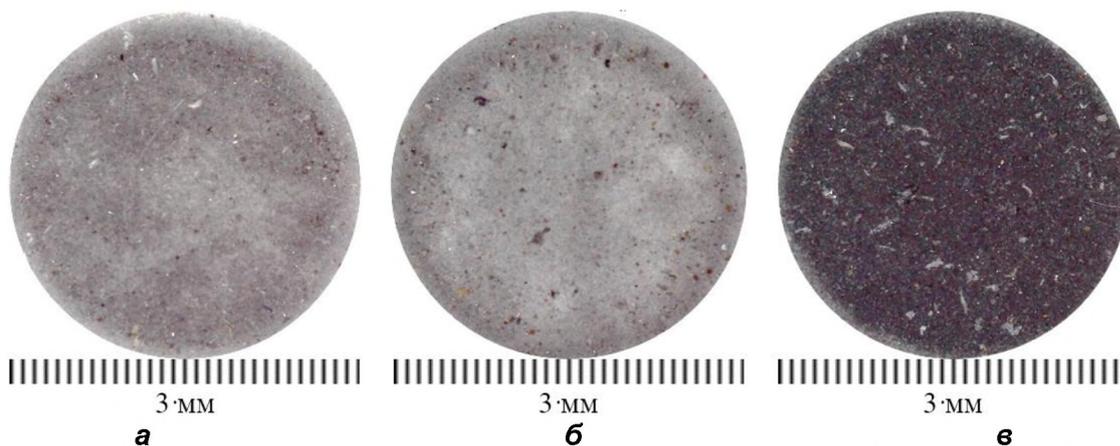


Рисунок 9. Изображения центрального участка фильтрограмм моторных масел Лукойл Авангард 10W40 с различной наработкой часов, полученные с помощью микроскопа Discovery Artisan 32, подключенного к ноутбуку: а – 30 ч; б – 100 ч; в – 150 ч

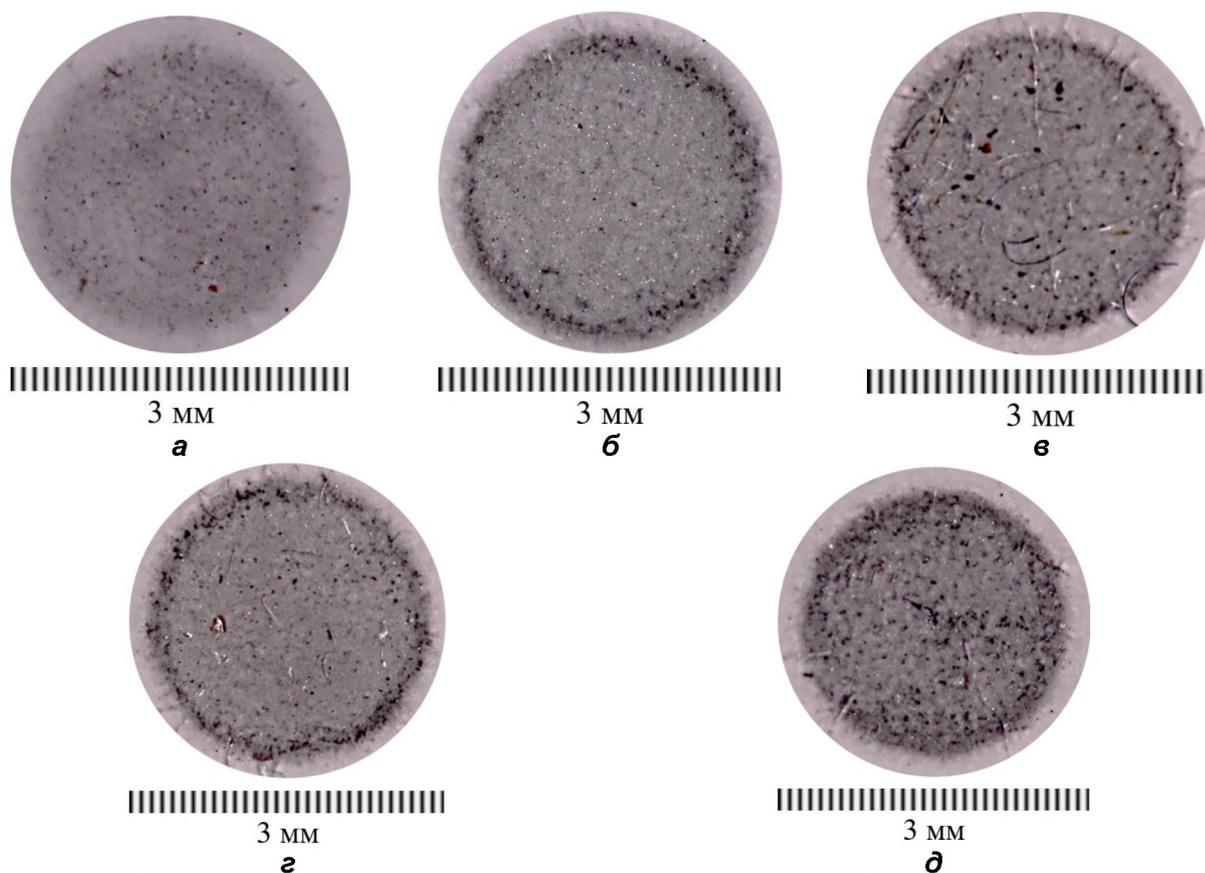


Рисунок 10. Фильтрограммы моторных масел марки Shell Rimula 10W40 с различной наработкой: а – 30 ч; б – 70 ч; в – 200 ч; г – 230 ч; д – 250 ч

Анализируя размеры и количество частиц износа, можно заключить, что моторные масла марки Shell Rimula 10W40 с наработкой 30 и 70 ч, имеющие частицы загрязнений, размеры которых не превышают 10 мкм, обеспечивают работу трибосопряжений ДВС в нормальном режиме изнашивания, а масла с наработкой более 200 ч – в предаварийном режиме изнашивания.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика и изготовлены приспособления для осуществления метода мембранной фильтрации. Предложено оборудование для микроанализа фильтрограмм моторного масла работающего ДВС непосредственно в условиях АПК. Показано, что метод

мембранной фильтрации может быть использован для оценки размеров и количества частиц загрязнений в моторном масле.

Приведены примеры оценки размеров и количества частиц загрязнений на фильтрограммах с использованием микроскопа отсчетного типа МПБ-2 и портативного цифрового микроскопа *Discovery Artisan 32*, а также беззеркального фотоаппарата *Canon EOS M50 Mark II* с объективом для макросъемки *Tokina ATX-I*.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Habib, K.A. Effect of debris size on the tribological performance of thermally sprayed coatings / K.A. Habib [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – V. 143. – P. 106025. – <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106025>.
2. Zhu, L. Qualitative Classification of Lubricating Oil Wear Particle Morphology Based on Coaxial Capacitive Sensing Network and SVM / L. Zhu [et al.] // *Sensors*. – 2022. – V. 22. – P. 6653. – <https://doi.org/10.3390/s22176653>.
3. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В.П. Миклуш [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 392 с.
4. Standard Guide for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants: ASTM D7684-11 (Reapproved 2020). – ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. – United States, 2020. – 10 p.
5. Westcott, V. Ferrographic Oil and Grease Analysis as Applied to Earthmoving Machinery / V. Westcott // SAE Technical Paper 750555. – 1975. – 12 p.

6. Метод определения механических примесей: ГОСТ 6370-2018. – Введ. 30.08.2018. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

7. Standard Test Method for Insoluble Contamination of Hydraulic Fluids by Gravimetric Analysis: ASTM D 4898-90 (Reapproved 1995). – ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959. – United States, 1995. – 3 p.

8. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей: ГОСТ 17216-2001. – Введ. 24.05.2001. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 12 с.

9. Чистота промышленная. Определение загрязненности жидкости методом счета частиц с помощью оптического микроскопа: ГОСТ ИСО 4407-2006. – Введ. 24.06.2006. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 19 с.

10. Standard Test Methods for Microscopical Sizing and Counting Particles from Aerospace Fluids on Membrane Filters: ASTM F312-97 (Reapproved 2003). – ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. – United States, 2003. – 4 p.

11. Patch Test Kits / Filtertechnik Ltd [Electronic resource]. – 2024. – Mode of access: <https://www.filtertechnik.co.uk/patch-test-kits>. – Date of access: 01.06.2024.

12. Portable Fluid Analysis Kit / Donaldson Company, Inc. [Electronic resource]. – 2024. – Mode of access: <https://www.donaldson.com/en-us/engine/filters/products/hydraulics/fluid-analysis/portable-fluid-analysis-kit/>. – Date of access: 01.06.2024.

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

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.07.2024

Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

Предназначена для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.



Основные технические данные

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрации	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрации	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.