Тип статьи: научная
УДК 621.43; 621.892
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-3-153-163

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА МОТОРНОГО МАСЛА ПО НАКОПЛЕНИЮ НЕРАСТВОРИМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Алексей Иванович Малютин [1]***, Евгений Анатольевич Татаренков*** [2]***,***
Сергей Юрьевич Панов [3]***, Зугум Сагидович Гасанов*** [4]
[1,2] *ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия*
[3,4] *Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия*
[3]malyutin-1980@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Малютин, malyutin-1980@mail.ru
Corresponding author: Aleksej Malyutin, malyutin-1980@mail.ru

Реферат. *В процессе интенсивной эксплуатации двигателей сельскохозяйственной техники в неблагоприятных условиях качество масла ухудшается, что приводит к износу трущихся поверхностей деталей, нарушению работы двигателя и увеличению риска возникновения нештатной операционной или аварийной ситуации. В статье рассмотрены причины возникновения аварийных ситуаций узлов двигателя, а также методы их снижения посредством применения системы диагностики моторного масла. Степень загрязненности моторного масла нерастворимыми примесями является одним из диагностируемых параметров, по которому определяется работоспособность всей технической системы. Современными методами анализа (лазерная дифракция, электронная рентгеноспектральная микроскопия) были установлены основные характеристики примесей в отработанных моторных маслах и их связь со степенью износа элементов двигателей автомобильной сельскохозяйственной техники. Использование данного вида диагностики позволяет произвести оценку состояния важнейших систем автомобиля. Диагностируемые признаки могут показать наличие технических проблем топливной и воздушной систем, цилиндропоршневой группы двигателя, так и нарушения в эксплуатации. Предлагается в качестве диагностического параметра трибомониторинга, являющегося показателем степени изнашивания деталей поршневой группы двигателя автомобильной техники сельскохозяйственного назначения использовать элементарную концентрацию железа в отобранных пробах машинного масла. Полученная по результатам рентгеноспектрального микровзвешивания зависимость концентрации металла (C_{Fe}) в машинном масле от содержания кремния (C_{Si}) аппроксимируется экспоненциальной зависимостью, что повышает точность прогнозирования ресурса машинного масла и технического состояния автомобиля. Применение данных методов контроля позволяет однозначно определить характер работы оборудования и своевременно обнаруживать возникновение дефектов.*

Ключевые слова*: моторные масла, загрязнения, износ, диагностика, надежность технических систем.*

MONITORING OF ENGINE OIL QUALITY BY ACCUMULATION OF INSOLUBLE MECHANICAL IMPURITIES

Aleksej Malyutin [1]***, Evgenij Tatarenkov*** [2]***, Sergej Panov*** [3]***, Zugum Gasanov*** [4]
[1,2]*Air force Academy named after Professor N. E Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh, Russia*
[3,4]*Voronezh state technical university, Voronezh, Russia*
[3]malyutin-1980@mail.ru

Abstract. *The quality of the oil deteriorates during the intensive operation of agricultural machinery engines in adverse conditions, which leads to wear of the rubbing surfaces of parts, disruption of the*

engine and an increase in the risk of an emergency operating or emergency situation. The causes of emergencies of engine components, as well as methods for their reduction through the use of an engine oil diagnostic system, are discussed in the article. The degree of contamination of engine oil with insoluble impurities is one of the diagnostic parameters by which the operability of the entire technical system is determined. Modern methods of analysis (laser diffraction, electron X-ray microscopy) have established the main characteristics of impurities in used engine oils and their relationship with the degree of wear of engine elements of agricultural machinery. The use of this type of diagnostics allows you to assess the condition of the most important systems of the car. The diagnosed signs can show the presence of technical problems of the fuel and air systems, the cylinder piston group of the engine, and violations in operation. It is proposed to use the elementary concentration of iron in the selected samples of engine oil as a diagnostic parameter of tribomonitoring, which is an indicator of the degree of wear of parts of the piston group of the engine of agricultural machinery. The dependence of the metal concentration (C_{Fe}) in engine oil on the silicon content (C_{Si}) obtained from the results of X-ray spectral microweighting is approximated by an exponential dependence, which increases the accuracy of predicting the engine oil resource and the technical condition of the car. The use of these control methods makes it possible to unambiguously determine the nature of equipment operation and detect the occurrence of defects in a timely manner.

Keywords: *engine oils, pollution, wear, diagnostics, reliability of technical systems.*

Для цитирования: Смирнов Д.Н., Чернопятова С.А., Малютин А.С., Панов С.Ю. Математическая модель оперативности ремонта автомобильной техники // Наука в Центральной России. 2023. Т. 63, № 3. С. 153-163. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-3-153-163.

For citation: Smirnov D, Chernopjatova S., Malyutin A., Panov S. Mathenatical model of the efficiency of repair of automotive equipment. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 64(3): 153-163. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-3-153-163.

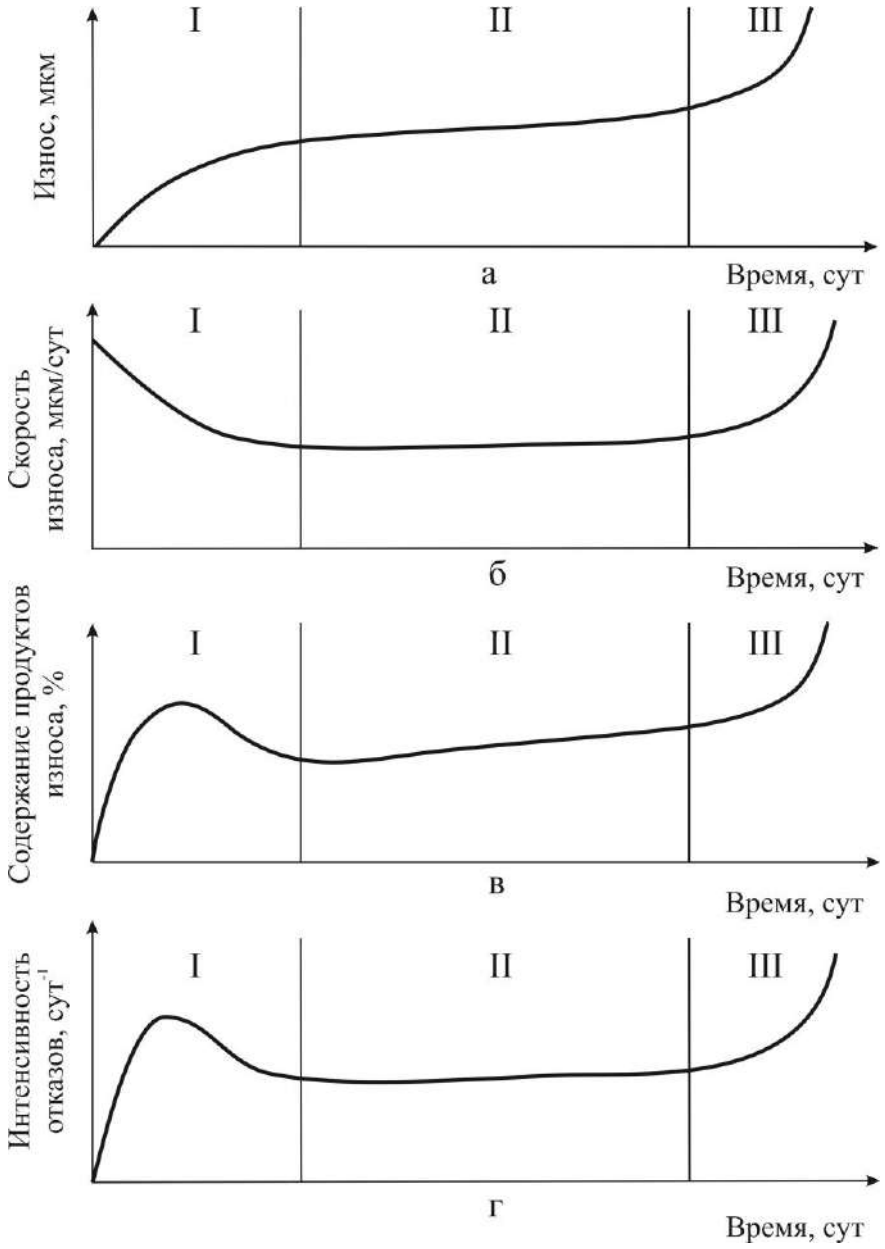
Введение. Анализ современных тенденций развития продовольственной безопасности показывает увеличение интенсивности применения сельскохозяйственной техники. Возрастание посевных площадей и массы сельскохозяйственной продукции вызывают необходимость увеличения объемов перевозок. Кроме того, различные климатические явления способствуют увеличения объема мероприятий по обслуживанию и подготовки сельскохозяйственной техники. Это приводит к увеличению интенсивности использования и расходу моторесурса, и следовательно, к увеличению выхода из строя машин по эксплуатационным причинам.

Эксплуатационные характеристики масла изменяются в течение времени в зависимости от операционных условий работы механизмов и узлов вместе с изменением их технического состояния.

Контроль состояния машины посредством анализа масла обычно осуществляется путем определения количества, размера и химического состава частиц износа, образующихся на поверхностях смазываемых деталей машины [1-5].

Графики (рисунок 1) показывают взаимосвязь технического состояния механизма и концентрации металлов в масле [2]. При этом видно, что повышение суммарного износа пары трения механизмов двигателя сопровождается увеличением скорости изнашивания, и как следствие возрастание концентрации металлов в масле. По понятным причинам в этот же период существенно возрастает интенсивности отказов (аварий).

Таким образом, становится очевидным, что анализ элементного состава примесей моторных масел и концентрация металлов в сочетании со знанием материалов, из которых изготовлен двигатель, может быть квалифицированным средством обследования текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса технической системы и ее отдельных составных частей.



а – износ механизма; б – скорости его изнашивания; в – содержание продуктов износа в масле; г – интенсивность потока отказов

I – зона приработки механизма; II – зона нормальной эксплуатации механизма; III – зона повышенных и аварийных износов механизма

Рисунок 1 – Изменение параметров работы двигателей от времени работы

Результаты и обсуждение.

При различных эксплуатационных режимах нагружения узлов механизмов машин сельскохозяйственного назначения и, соответственно видов изнашивания деталей, образуются частицы износа различных форм и размеров.

Различают нормальное, коррозионное, механическое и усталостное изнашивание.

Частицы нормального износа получаются в результате микроотслаивания и, чаще всего, обладают гладкой поверхностью линейным размером 1…5 мкм и отношением толщины к линейному размеру 1:2 или 1:5.

Частицы, образующиеся при коррозионном изнашивании, представляют собой множественные сколы частиц разрушенных оксидных пленок, сформированных на поверхности деталей в процессе эксплуатации. Размер таких чешуек не превышает 1 мкм.

При механическом изнашивании (жесткое скольжение, микрорезание) образуются частицы неправильной формы с неровными рваными краями размером 10-150 мкм либо микростружечные структуры длиной до 2 мм. Отношение толщины к линейному размеру варьируются от 1:5 в первом случае до 1:50 во втором. Этому виду изнашивания чаще всего подвергаются поршневые кольца, зубья высоконагруженных шестерней, роликовые подшипники.

Усталостное изнашивание связано со снижением прочности конструкционного материала деталей, вследствие постоянного накопления повреждений под действием переменных нагрузок. Так как повреждения в данном случае происходит при образовании микротрещин, их расширении и последующее разрушении, частицы могут быть в виде осколка неправильной формы или гладкой чешуйки (лепестка). Линейные размеры характерные для частиц этого вида изнашивания составляет 10-200 мкм. Кроме того, к усталостному изнашиванию относят кавитационное разрушение материала. При этом образуются почти сферические частицы 1…100 мкм.

Детальная классификация морфологии частиц износа приводится в работе В.А. Степанова [5].

Степень износа элементов механизма может быть определена по концентрации частиц износа в работающем масле и их фракционному составу.

В качестве диагностического параметра состояния механической системы и степени износа её элементов могут служить линейные размеры и дисперсность (средняя концентрация частиц в работающем масле).

Одним из совершенных методов определения размеров частиц (гранулометрического анализа) является метод лазерной дифракции, основанной на измерении угловой зависимости рассеянного света, например с помощью лазерного анализатора.

Полученные результаты различных измерений обеспечили удобство анализа данных и составления отчётов (рисунок 2).

Представленные зависимости распределения диаметров частиц износа в моторном масле от длительности пробега в условиях интенсивной работы автомобильной техники во время сезонных сельскохозяйственных работ показывает закономерность интенсивности изнашивания механизмов от содержания в работающем масле крупных частиц.

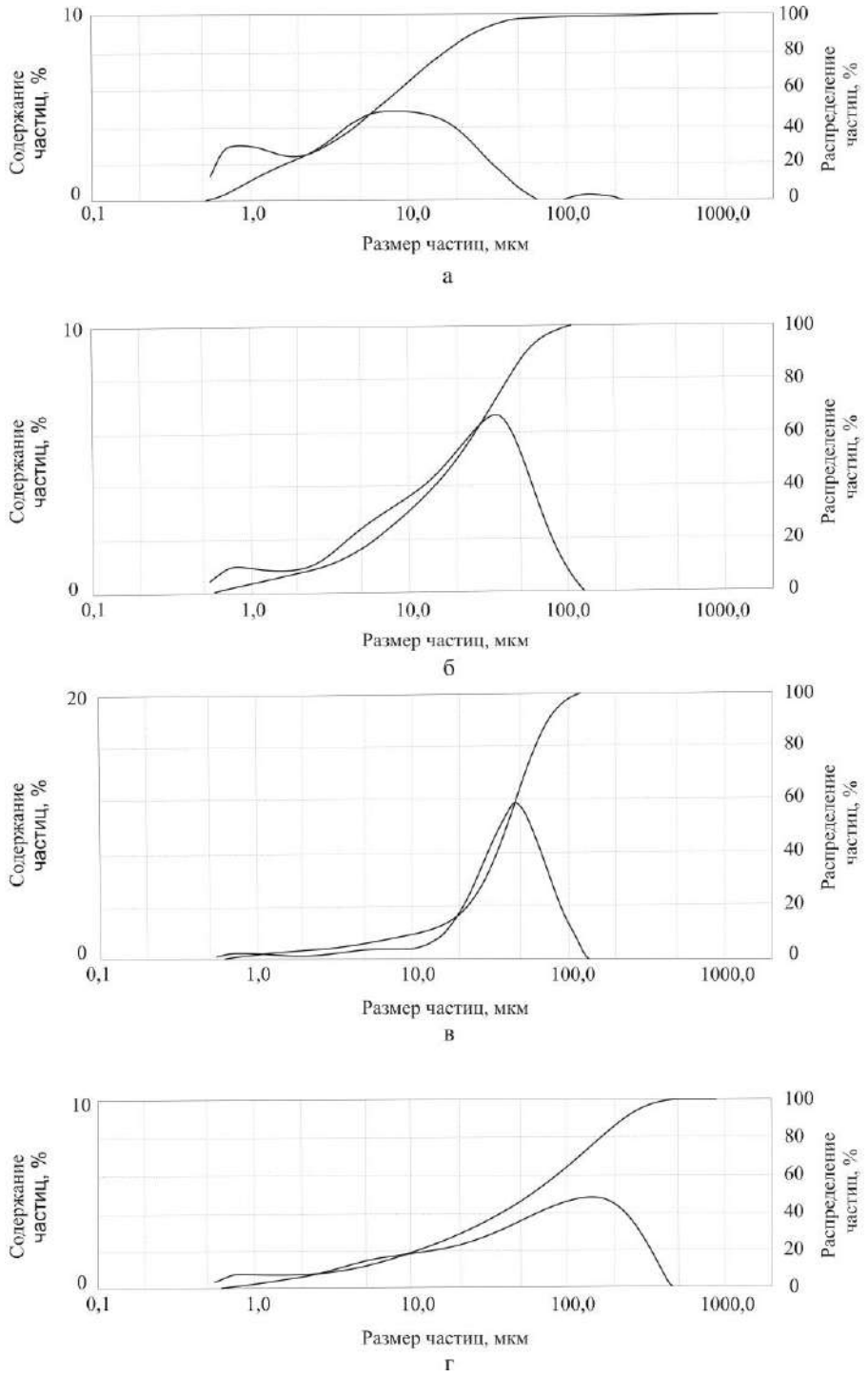
При нормальном функционировании отмечаются практически равномерное распределение частиц износа от 1 до 20 мкм (рисунок 2 а).

При повышенном износе дисперсия перемещается в область содержания крупных частиц (рисунок 2 б, в). Средний медианный размер - 50…100 мкм. При этом максимальный размер обнаруженных частиц в масле не превышает 200 мкм.

Предаварийное состояние (рисунок 2 г) характеризуется образованием частиц до 500 мкм, что свидетельствует о критическом износе элементов механизмов.

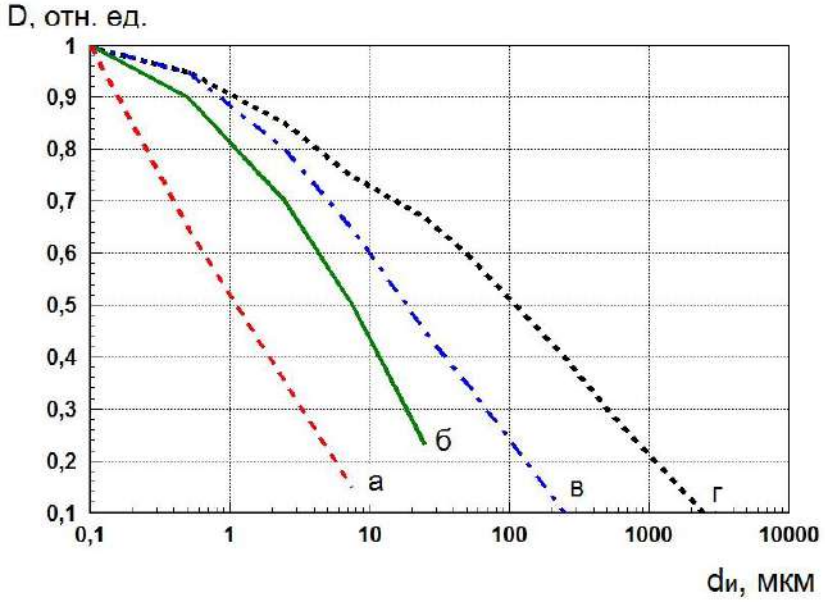
Интегральные кривые логарифмически-нормального распределения диаметров частиц износа по размерам для разных режимов эксплуатации моторных масел, которые могут служить диагностическими диапазонами, приведены на рисунке 3.

При изучении микрофотографий (рисунок 4) установили, что частицы износа имеют хлопьевидную форму с преобладанием размеров менее 10 мкм. Частицы в большей степени образуют конгломераты, при этом молекулы и смолоподобные частицы тяжелых фракций моторного масла являются своеобразными полимерными "мостиками" удерживающими неорганические частицы износа между собой.



а) - пробег 4000 км (нормальный износ); б) - пробег 6500 км (начальный повышенный износ); в) - пробег 8000 км (повышенный износ); г) - пробег 12000 км (предаварийный износ)

Рисунок 2 – Распределение диаметров частиц износа в моторном масле по данным измерения с помощью лазерного анализатора



а) нормальный износ; б) повышенный износ; в) предаварийный повышенный износ; г) аварийный износ.

Рисунок 3 – Интегральные кривые логарифмически-нормального распределения диаметров частиц износа по размерам для разных режимов эксплуатации моторных масел

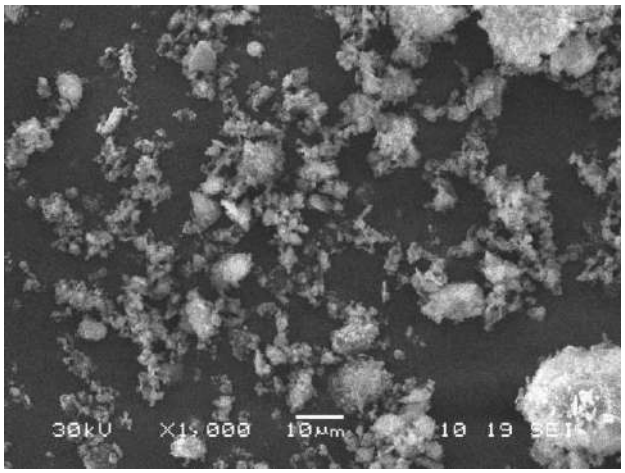


Рисунок 4 – Микрофотография частиц износа в моторном масле (пробег 6500 км)

Диагностика содержания некоторых элементов, в частности, металлов в работающем моторном масле необходима для составления программы планово-предупредительного обслуживания машин и механизмов. Аналогично оперативный контроль состояния масленых присадок по наличию элементов также требует различных мероприятий по техническому обслуживанию. Многоэлементный анализ в сочетании со знанием материалов, из которых изготовлен двигатель, часто позволяет идентифицировать приближающийся отказ конкретного компонента.

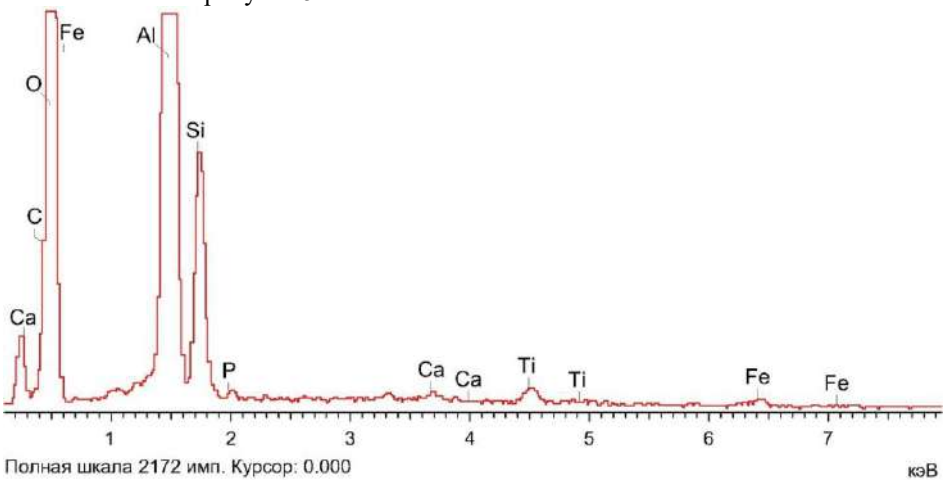
Благодаря этому заблаговременному предупреждению можно принять меры для исправления ситуации до того, как произойдет серьезное повреждение оборудования или несчастный случай с персоналом.

Для определения химических элементов примесей, содержащихся в моторном масле и изучения морфологии частиц износа в работе использована электронная микроскопия совместно с рентгено-спектральным микроанализом [7-9].

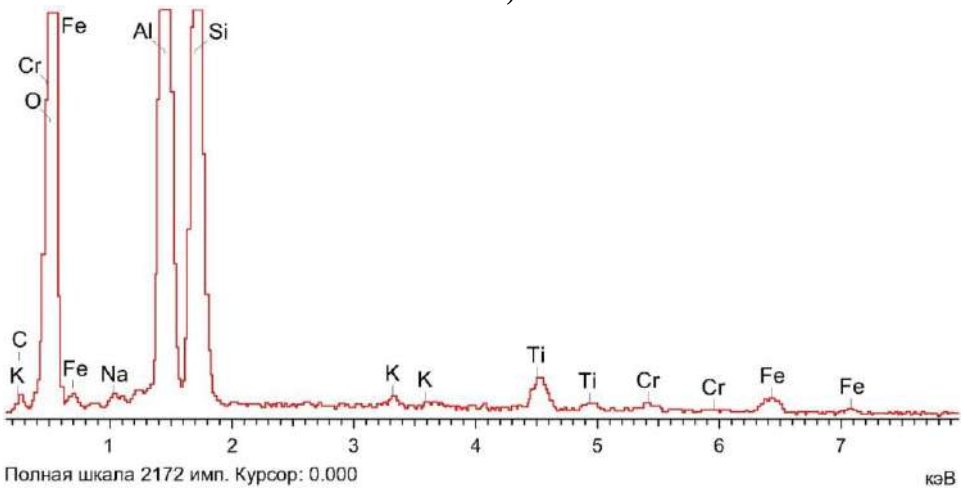
Отфильтрованные осадки масляных проб предварительно подвергались пиролитическому удалению органической составляющей, а полученный твердый остаток помещали на специальную подложку с проводящим клеем, покрывали пленкой коллоидного золота ионно-плазменным методом, после чего микроскопические препараты подложки устанавливали на предметный столик микроскопа.

Микроскопический анализ производили в растровом электронном микроскопе в режиме вторичных электронов, просматривая фотоснимки и проекции препарата на экран.

Рентгено-спектральный микроанализ выявил наличие определенных групп химических элементов показанных на рисунке 5.



а)



б)

а - пробег 4000 км, б - пробег 12000 км

Рисунок 5 – Результаты спектрального анализа образцов моторного масла

Находящиеся в отработанном моторном масле химические элементы отражают состояние элементов механизмов двигателя и условия их эксплуатации.

Результаты спектрального анализа образца моторного масла (рисунок 5,а) показывает наличие небольшого количества элементов металлов (продуктов износа деталей двигателя при их трибологическом взаимодействии) и элементов присадок, входящих в состав масел.

При этом следует отметить повышенную концентрацию алюминия и кремния. Причинами этого может быть повреждение поршней изготовленных из алюминиевого сплава либо проникновение пыли каолинового состава (глина), вследствие неисправности воздушной фильтровальной системы или из-за потери герметичности некоторых соединений. В дальнейшем попадание данных частиц в зоны трения вызывает механическое изнашивание соприкасающихся поверхностей.

На рисунке 5,б показаны результаты, характеризующие повышенный износ. Наличие легирующих элементов показывают срабатывание упрочняющего слоя элементов механизмов, в частности поршневых колец (Cr). Следует отметить снижение по сравнению с исходным уровнем элементов содержащихся в присадках (Ca, P). Наличие элементов (Na, K) свидетельствует об утечке охлаждающей жидкости.

Детальная расшифровка источников поступления металлов в рабочем моторном масле от двигателей дана в таблице 1.

Таблица 1 - Элементы, входящие в состав моторных масел, присадок и продуктов износа

Элемент	Источники поступления	Диагностический признак
Fe (Железо)	Конструктивный элемент деталей двигателя.	Износ поршневых и маслосъёмных колец, поршней, штока поршня, цилиндровых втулок, коленчатых и распределительных валов
Si (Кремний)	1.Проникновение в систему вместе с загрязненным воздухом (песок); 2. Входит в состав противопенных присадок. 3.Использование в качестве легирующей добавки в некоторые сплавы материалов деталей двигателя (поршней и коленчатых валов)	-Износ систем фильтрования; -Нарушение герметичности системы -Дополнительный показатель износа некоторых деталей
Al (Алюминий)	1.Проникновение в систему вместе с загрязненным воздухом (глина); 2. Конструктивный элемент деталей двигателя (поршней).	-Износ систем фильтрования; -Нарушение герметичности системы -Износ поршней
Cr (хром)	Использование в качестве легирующей добавки в некоторые сплавы материалов деталей двигателя	Износ поршневых и маслосъёмных колец
Ti (Титан)	Использование в качестве легирующей добавки в некоторые сплавы материалов деталей двигателя	Износ коленчатого и распределительного валов
Ca (Кальций)	1.Проникновение в систему вместе с загрязненным воздухом (мел); 2.Входит в состав нейтрализующих присадок.	-Износ систем фильтрования; -Нарушение герметичности системы -Срабатывание присадок
P (Фосфор)	Входит в качестве pH-буфера в состав противоизносных и антиокислительных присадок	Срабатывание присадок
K (калий)	Входит в качестве pH-буфера в состав охлаждающей жидкости	Утечка охлаждающей жидкости
Na (натрий)	Входит в качестве ингибитора в состав охлаждающей жидкости	Утечка охлаждающей жидкости

Резюмируя вышеизложенное, предлагается в качестве диагностического параметра трибомониторинга, являющегося показателем степени изнашивания деталей поршневой группы двигателя автомобильной техники сельскохозяйственного назначения использовать элементарную концентрацию железа в отобранных пробах машинного масла.

Представляет интерес полученная по результатам рентгеноспектрального микровзвешивания зависимость концентрации металла (C_{Fe}) в машинном масле от содержания кремния (C_{Si}), представленная на рисунке 6.

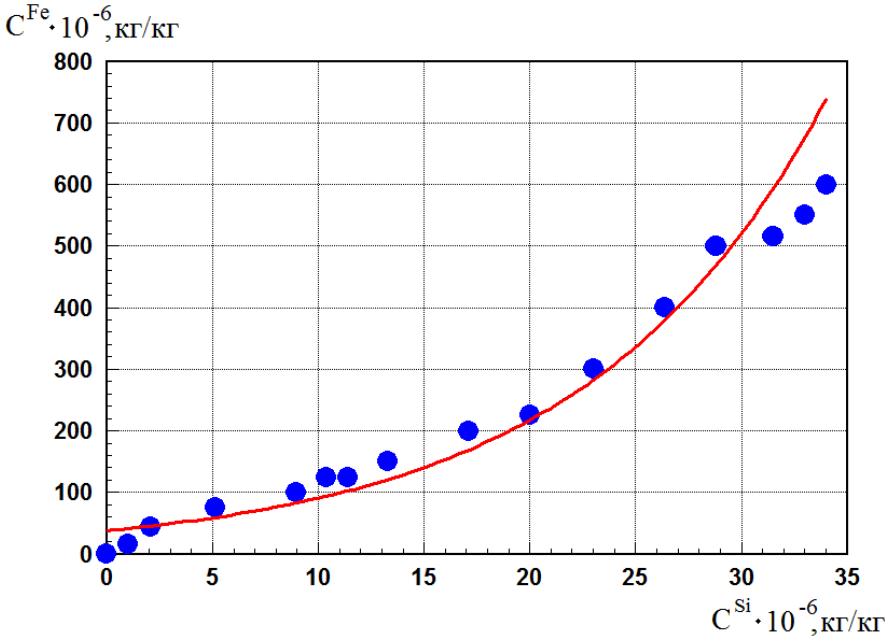


Рисунок 6 – Зависимость концентрации металла в машинном масле от содержания кремния

Данные, представленные на рисунке 6 хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью:

$$C_{Fe} = 37{,}8e^{0{,}087 C_{Si}},$$

Соотношение доказывает нелинейный характер изменения величины износа металлических частей двигателя от абразивного воздействия кремния. Ранее в литературе [10, 11] отмечалось наличие функциональной линейной зависимости, что снижало, на наш взгляд, точность прогнозирования ресурса машинного масла.

Выводы. Показано, что находящиеся в рабочем моторном масле элементы (главным образом металлы) - продукты износа деталей двигателя являются в задаче трибомониторинга и трибодиагностики диагностическими параметрами, адекватно отражающие состояние структурных элементов двигателей сельскохозяйственной техники, условия их смазывания и интенсивность нагружения.

Получены однозначные функциональные зависимости показателей: концентрации и размера металлических частиц износа в масле от интенсивности изнашивания поверхностей трения, а определенные при этом интегральные кривые логарифмически-нормального распределения диаметров частиц износа по размерам для разных режимов эксплуатации моторных масел, могут служить диагностическими диапазонами.

Получена зависимость, доказывающая нелинейный характер изменения величины износа металлических частей двигателя от абразивного воздействия кремния.

Список источников

1. Перспективы развития трибодиагностики / Л.В. Маркова и др. // Трение и износ. 2006. Т. 27, № 2. С. 175–184.

2. Надежкин, А. В. Мониторинг работающего моторного масла в системе обеспечения безопасной ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей / диссертация ... доктора технических наук по специальности ВАК РФ 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные). Владивосток, 2011

3. Григорьев М.А. Качество моторного масла и надежность двигателей / М.А. Григорьев, Б.М. Бунаков, В.А. Долецкий. М.: Изд-во стандартов, 1981. 232 с

4. Соколов А.И. Диагностирование современных ДВС по параметрам работающего масла / А.И. Соколов // Двигателестроение. 1989. № 10. С. 29–31.

5. Степанов В.А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле / В.А. Степанов. - Рыбинск: ЦИАМ, 2002. - 232 с.

6. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / Л.: Химия, 1987. 264 с.

7. Smith M. Oil analysis vs. microscopic debris analysis: when and why to choose // Practicing Oil Anal. Mag. 2004. № 5. P. 111–124.

8. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. И др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир, 1984.

9. Градус Л.Я. Руководство по дисперсному анализу методом микроскопирования. М.: Химия, 1979. 232 с.

10. Бойков Д.В., Борисов А.И., Ефремов В.Н. Диагностирование технического состояния дизелей городских автобусов по результатам анализа работавшего масла // Химия и технология топлив и масел. 1997. № 5. С. 41–43.

11. Носова Е.В. Метод замены моторных масел по фактическому состоянию: На примере грузовых автомобильных перевозок в условиях АПК: дис. к-та тех. наук: 05.20.03 / Носова Евгения Викторовна. Иркутск, 1995. 169 с.

References

1. Prospects for the development of tribodiagnostics / L.V. Markova et al. // Friction and wear. 2006. Vol. 27, No. 2. pp. 175-184.

2. Reliable, A.V. Monitoring of running engine oil in the system for ensuring safe resource-saving operation of marine diesel engines / dissertation... Doctor of Technical Sciences in the specialty of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.08.05 – Ship power plants and their elements (main and auxiliary). Vladivostok, 2011

3. Grigoriev M.A. Engine oil quality and engine reliability / M.A. Grigoriev, B.M. Bunakov, V.A. Doletsky. M.: Publishing House of Standards, 1981. 232 p

4. Sokolov A.I. Diagnostics of modern internal combustion engines according to the parameters of the working oil / A.I. Sokolov // Engine building. 1989. No. 10. pp. 29-31.

5. Stepanov V.A. Diagnostics of the technical condition of transmission units of gas turbine engines according to the parameters of wear products in oil / V.A. Stepanov. - Rybinsk: CIAM, 2002. - 232 p.

6. Kouzov P.A. Fundamentals of the analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials / L.: Chemistry, 1987. 264 p.

7. Smith M. Oil analysis vs. microscopic debris analysis: when and why to choose // Practicing Oil Anal. Mag. 2004. № 5. P. 111–124.

8. Gouldstein J., Newbury D., Etchlin P. And others. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: In 2 volumes. Trans. from English M.: Mir, 1984.

9. Gradus L.Ya. Guide to disperse analysis by microscopy. M.: Chemistry, 1979. 232 p.

10. Boikov D.V., Borisov A.I., Efremov V.N. Diagnostics of the technical condition of city bus diesels based on the results of the analysis of the working oil // Chemistry and technology of fuels and oils. 1997. No. 5. pp. 41-43.

11. Nosova E.V. The method of replacing motor oils according to the actual condition: On the example of truck transportation in the conditions of the agro-industrial complex: dis. k-ta of technical sciences: 05.20.03 / Nosova Evgeniya Viktorovna. Irkutsk, 1995. 169 p.

Информация об авторах

А.И.Малютин – соискатель; Е. А. Татаренков - кандидат технических наук; С.Ю. Панов - доктор технических наук; З.С. Гасанов - кандидат технических наук.

Information about the authors

A.Malyutin – applicant; E. Tatarenkov - Candidate of Technical Sciences; S. Panov - Doctor of Technical Sciences; Z. Gasanov - Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: А.И. Малиютин – обзор литературных источников по исследуемой проблеме, проведение экспериментальных исследований, подготовка рукописи; Е.А. Татаренков – выполнение расчетов, консультация в ходе исследования; С.Ю. Панов – формулировка цели и выводов, разработка методики исследований, анализ результатов исследований; З.С. Гасанов – обработка результатов экспериментов, подготовка и корректировка рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: A.Malyutin – review of literature sources on the problem under study, conducting experimental studies, preparing the manuscript; E.Tatarenkov - performing calculations, consulting during the study; S. Panov - formulation of goals and conclusions, development of research methodology, analysis of research results; Z. Gasanov - processing of experimental results, preparation and correction of the manuscript.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 18.05.2023 Принята к публикации (Accepted): 21.06.2023