УДК 621.892
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-127-134

АТОМНО-АБСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗНОСА МОТОРНЫХ МАСЕЛ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ

Владимир Константинович Нагдаев [1]***, Валерий Васильевич Остриков*** [2]***, Александр Викторович Кошелев*** [3]**, Дмитрий *Николаевич Жерновников*** [4]
[1,2,3,4]*Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия*
[2] viitinlab8@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-2927-768X

Автор ответственный за переписку: Валерий Васильевич Остриков, viitinlab8@bk.ru
Corresponding author: Valerij Ostrikov, viitinlab8@bk.ru

Реферат. *Содержание металлов износа в моторных маслах позволяет контролировать во времени, как изменение свойств масел, так и исправность узлов двигателя. Анализ закономерности изменения элементного состава масла позволяет оценить эффективность применения промывочных и обкаточных моторных масел, контролировать процесс очистки отработанных масел и изменение свойств масел в двигателях сельхозтехники в период межсезонного хранения. Определение элементов износа (железо, алюминий, медь и хром) проводились на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915М фирмы Люмэкс ООО "Атомприбор". Эффективность обкатки двигателя Д-240 контролировалась по изменению концентрации элементов износа. В состав обкаточного масла входило: 1% масс. карбамида + 0,5% масс. графенового концентрата + 1% масс. олеиновой кислоты - остальное очищенное моторное масло. В качестве атомизатора использовалась графитовая печь с пиро-покрытием, и платформой Львова. На основе очищенного моторного масла М–10ДМ готовилось рабоче-консервационное масло, содержащее дополнительно 6% полимеризованного рапсового масла и 6% пушечной смазки. Растворы проб моторного масла готовились их разбавлением метил-изобутил-кетоном квалификации «хч». Установлено, что промывочное масло, полученное очисткой отработанного масла., эффективно удаляет элементы износа из двигателя. Содержание железа уменьшилось в 2,5 раза, алюминия в 1,5 раза, меди в 5 раз, а хрома - в 3 раза. Определено, что очистка масла гидроксидом аммония и карбамидом более качественно промывает двигатель по сравнению с очисткой смесью изопропанола (3 %) и моно-этаноламина (3 %). Проведены исследования моторных масел в узлах трения комбайнов в сравнительном режиме – в моторном масле перед установкой комбайнов на хранение и после хранения в течении шести месяцев. После обобщения полученных результатов по определению элементов продуктов износа в работавших в двигателях комбайнов моторных маслах, их осаждении в процессе хранения (простоя), сделан вывод о целесообразности замены масел перед постановкой на хранение.*

Ключевые слова: *моторное масло промывочное, обкаточное, отработанное, консервационное, атомно-абсорбционный анализ, элементы износа.*

ATOMIC ABSORPTION METHOD OF CONTROL OF WEAR ELEMENTS OF MOTOR OILS IN VARIOUS APPLICATION CONDITIONS

Vladimir Nagdaev [1]***, Valery Ostrikov*** [2]***, Alexander Koshelev*** [3]***, Dmitry Zhernovnikov*** [4]
[1,2,3,4] *All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russia*
[1]viitinlab8@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-2927-768X

Abstract. *The content of wear metals in engine oils allow you to control over time both the change in the properties of oils and the serviceability of engine components. An analysis of the pattern of changes in*

the elemental composition of the oil makes it possible to evaluate the effectiveness of the use of flushing and break-in motor oils, to control the process of cleaning used oils and changes in the properties of oils in agricultural machinery engines during the off-season storage period. Determination of wear elements (iron, aluminium, copper and chromium) was carried out on an MGA-915M atomic absorption spectrometer manufactured by Lumex LLC Atompribor. The running-in efficiency of the D-240 engine was controlled by changing the concentration of wear elements. The composition of the break-in oil included: 1% of the mass. urea + 0.5% wt. graphene concentrate + 1% wt. oleic acid - the rest is refined motor oil. A pyro-coated graphite furnace with a Lvov platform was used as an atomizer. A working preservation oil containing an additional 6% polymerized rapeseed oil and 6% gun grease was prepared on the basis of purified M-10DM motor oil. Solutions of engine oil samples were prepared by diluting them with methyl isobutyl ketone, chemically pure grade. Flushing oil obtained by refining used oil has been found to effectively remove wear elements from the engine. The content of iron decreased by 2.5 times, aluminum by 1.5 times, copper by 5 times, and chromium by 3 times. It has been determined that cleaning the oil with ammonium hydroxide and carbamide flushes the engine more efficiently compared to cleaning with a mixture of isopropanol (3%) and mono-ethanolamine (3%). Researches of motor oils in friction units of combines were carried out in a comparative mode - in motor oil before installation of combines for storage and after storage for six months. It is concluded that it is expedient to replace oils before storage after summarizing the results obtained by determining the elements of wear products in motor oils that worked in the engines of combine harvesters, their precipitation during storage (idle time).

Keywords: *washing engine oil, running-in, spent, conservation, atomic absorption analysis, wear elements.*

Для цитирования: Нагдаев В.К., Остриков В.В., Кошелев А.В., Жерновников Д.Н. Атомно-абсорбционный метод контроля элементов износ моторных масел в различных условиях применения // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023. Т. 62, № 2. С. 127-134. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-127-134.

For citation: Nagdaev V., Ostrikov V., Koshelev A., Zhernovnikov D. Atomic absorption method of control of wear elements of motor oils in various application conditions // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023; 62(2): 127-134. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-127-134.

Введение. Контроль изменений свойств моторного масла, смазывающего работающие узлы машины, - мощный инструмент раннего выявления неисправностей узлов. Изменения, происходящие в работающем масле, могут служить индикаторами износа конкретных деталей механизма, попадания в него внешних загрязнителей, таких как влага, пыль, топливо, гликоли. В ряде случаях замена масла, по истечении регламентированного интервала, оказывается неоправданной, так как сливать приходится еще пригодное для работы масло.

Идеология анализа эксплуатационного масла отличается от идеологии анализа масла при его производстве. Если при производстве важно обеспечить попадание показателей качества в заданные, заранее известные пределы, то при диагностическом контроле важно следить не столько за абсолютными значениями тех или иных показателей, сколько за изменением этих величин во времени.

В диагностическом контроле к традиционным показателям качества масла, таким как вязкость, температура вспышки, содержание присадок, добавляются новые: общее содержание ферромагнитных загрязнителей и металлов износа, содержание сажи, нитрование, сульфирование, потенциал лакообразования и многие другие [1, 2, 3. 4].

Для более глубокого понимания процессов износа и загрязнения, происходящих в машине, важно иметь максимально полную информацию об элементном составе пробы масла. Эту информацию получают с помощью двух основных методов: атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) либо атомно-эмиссионной спектрометрии на вращающемся дисковом электроде (АЭС-ВДЭ) [5, 6.7]. Каждый из этих методов позволяет одновременно определять содержание более 20 химических элементов в пробе. В случае

определения небольшого числа металлов износа (2-5) целесообразно применение метода атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией (ААС с ЭТА) [8. 9].

Целью работы является оценка эффективности применения промывочных и обкаточных масел, контроль процесса очистки моторных масел и процесса изменения моторных масел в результате хранения сельхозтехники (комбайнов), с проведением элементного анализа на содержание металлов износа методом ААС с ЭТА.

Материалы и методы. Измерения атомного поглощения проводились на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915М фирмы Люмэкс ООО "Атомприбор" (рисунок 1). В качестве атомизатора использовалась графитовая печь с пиро-покрытием, и платформой Львова. Растворы проб моторного масла готовились их разбавлением метил-изобутил-кетоном (МИБК) квалификации «хч» в 20 и 200 раз. Это позволило определять всю группу исследуемых элементов.

Рисунок 1 - Атомно-абсорбционный спектрометр МГА-915М

Результаты и их обсуждение. Эффективность промывочного масла на основе отработанного очищенного масла демонстрируют данные, приведенные в таблице 1. Промывочное масло эффективно удалило элементы износа из двигателя. Содержание железа уменьшилось в 2,5 раза, алюминия в 1,5 раза, меди в 5 раз, а хрома в 3 раза.

Таблица 1 - Результаты атомно-абсорбционного анализа элементов- индикаторов износа в промывочном моторном масле

Элемент	Промывочное масло исходное		Промывочное масло после промывки двигателя	
	мг/л	p.p.m.	мг/л	p.p.m.
Fe	1,96	2,16	4,83	5,31
Al	1,02	1,12	1,61	1,77
Cu	0,04	0,05	0,24	0,26
Cr	0,12	0,13	0,35	0,38

Приготовлены промывочные масла из отработанных моторных масел с различными чистящими реагентами: образец № 1 - отработанное очищенное масло с помощью гидроксида аммония и карбамида и добавлением диметилсульфоксида (2,5%), изопропилата калия (2,5%) и дизельного топлива (2,5%) из двигателя № 1; образец № 2 - отработанное очищенное масло (с помощью изопропанола (3 %) и моно-этаноламина 3 %)) моторное масло с добавлением диметилсульфоксида (2,5 %), изопропилата калия (2,5 %) и дизельного топлива (2,5%) из двигателя №2. Исследовали 2 пробы каждого образца: одну до промывки двигателя (двигателя №1 для первого образца, двигателя №2 – для второго образца), вторую-после. В таблице 2 показаны результаты атомно-абсорбционного анализа этих проб.

Наилучшими промывочными свойствами обладает масло образца №1. Концентрация железа в образце №1 увеличивается в промывочном масле со 130 мг/л до 294 мг/л, а в образце №2 со -138 мг/л до 150 мг/л. Образец №2 в некоторых случаях (алюминий, хром) десорбирует элементы износа и незначительно сорбирует железо и медь. Вероятнее всего, это связано с частичным осаждением алюминия и хрома на поверхностях цилиндропоршневой группы двигателя

Эффективность обкатки двигателя после капитального ремонта оценивали по изменению элементов износа до и после обкатки двигателя. По завершении обкатки двигателя Д-240, слитое

из картера двигателя обкаточное масло, а также образец экспериментального обкаточного масла контролировались на содержание элементов износа: железо, алюминия, меди и хрома [10].

Таблица 2 - Результаты атомно-абсорбционного анализа элементов- индикаторов износа в промывочном моторном масле с различными чистящими агентами

Элемент	Образец	Промывка двигателя	Концентрация	
			мг/л	p.p.m
Железо	№1	до промывки	130,0	143,0
		после промывки	294,9	324,4
	№2	до промывки	138,7	153,7
		после промывки	150,6	165,7
Алюминий	№1	до промывки	54,3	59,8
		после промывки	160,3	176,3
	№2	до промывки	153,1	168,4
		после промывки	80,9	89,0
Медь	№1	до промывки	5,5	6,0
		после промывки	19,1	21,0
	№2	до промывки	4,0	4,4
		после промывки	14,2	15,7
Хром	№1	до промывки	12,9	14,1
		после промывки	20,9	23,0
	№2	до промывки	14,4	15,8
		после промывки	11,4	12,6

Исследовались две пробы масла:

- проба 1 – экспериментальное обкаточное масло до проведения обкатки. Состав отработанного очищенного масла: 1% масс. карбамида + 0,5% масс. графенового концентрата + 1% масс. олеиновой кислоты - остальное очищенное масло;
- проба 2 - экспериментальное обкаточное масло после обкатки в двигателе.

Результаты проведенного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты атомно-абсорбционного анализа элементов- индикаторов износа в обкаточном моторном масле

Элемент	№ пробы	Концентрация	
		мг/л	ppm
Fe	1	5,05	5,51
	2	6,88	7,50
Al	1	0,52	0,57
	2	2,48	2,70
Cu	1	1,13	1,23
	2	3,79	4,14
Cr	1	0,16	0,17
	2	0,99	1,08

Увеличение концентрации железа Fe с 5,05 мг/л до 6,88 мг/л, а также Cr с 0,16 мг/л до 0,99 мг/л в масле свидетельствует о том, что в период обкатки происходила интенсивная приработка сопряжения «кольцо – гильза» (что подтверждается зависимостью изменения средней величины компрессии по цилиндрам), а также поверхностей шеек коленчатого вала, что вызвано вероятнее всего, абразивным действием карбамида в период холодной обкатки. Изменение показателей значений содержания Al с 0,52 мг/л до 2,48 мг/л (почти в 5 раз) а также Cu с 1,13 мг/л до 3,79 мг/л (почти в 3 раза), говорит о высоком качестве приработки поверхностей вкладышей коленчатого вала, то есть за время приработки был снят лишний метал с поверхностей трения [10].

В процессе работы моторных масел в узле трения, как правило, образуются элементы износа трущихся деталей. Чем эффективнее масло, тем, соответственно, данных примесей меньше. Были проведены исследования моторных масел комбайнов до и после хранения в узлах трения. Анализ проводился в сравнительном режиме – в моторном масле перед установкой комбайнов на хранение и после хранения в течении шести месяцев. После завершения этапа производственных испытаний анализировался элементный состав моторных масел. Анализ содержания железа проводился как за период наработки комбайнов в течение 200 часов, в сравнении с исходным маслом М–10ДМ. Пробы масел отбирались из двигателей комбайнов «Полесье» GS-12,18 первого года эксплуатации и более 10 лет использования в условиях АО ПЗ «Пригородный» Тамбовского района Тамбовской области. В таблице 4 представлены результаты определения содержания железа и алюминия в товарном масле М–10ДМ и масле М–10ДМ после 200 часов наработки в двигателе комбайна «Полесье» и этом же масле (работавшем) после его очистки предлагаемым способом.

Таблица 4 – Содержание элементов металлов (железа, алюминия) в моторных маслах

Наименование образца масла	Железо		Алюминий	
	мг/л	ppm	мг/л	ppm
Товарное масло М–10ДМ	0,83	0,91	1,39	1,53
Масло М–10ДМ после наработки 200 часов	26,2	28,82	4,07	4,48
Масло М10–ДМ после 200 часов работы в ДВС и последующей очистки	2,20	2,30	1,05	1,96

В результате спектрального анализа установлено, что содержание железа в масле, проработавшем в двигателе 200 часов, увеличилось более чем в 30 раз, алюминия – почти в 3 раза. Удаление загрязнений разработанным способом из масла позволяет снизить содержание железа и алюминия до значений, приближенных к товарному маслу (на момент его заправки до начала работы двигателя).

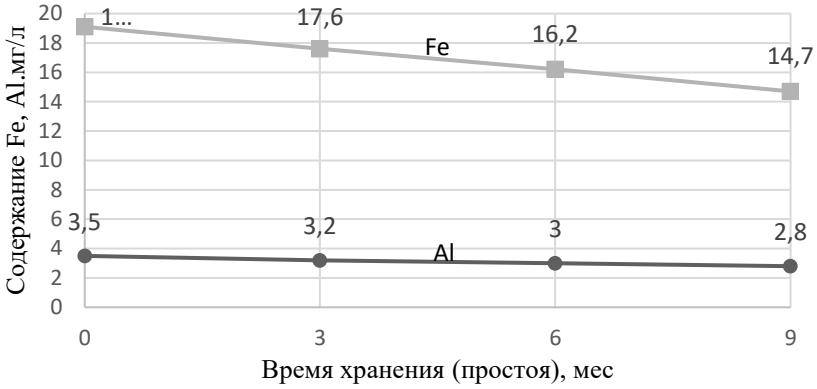
Как отмечалось ранее, содержание железа и алюминия в моторном масле после завершения работ может быть различным в зависимости от технического состояния двигателя и ряда других причин. На основе очищенного моторного масла М–10ДМ готовилось рабоче-консервационное масло, содержащее дополнительно 6 % полимеризованного рапсового масла и 6 % пушечной смазки. В результате определения содержания цинка в предлагаемом составе и товарном рабоче-консервационном масле К–17 установлены некоторые противоречия (таблица 5). Увеличенное содержание цинка в предлагаемом составе, по сравнению с консервационным маслом К–17, для наших условий работы двигателя в ограниченном временном режиме возможно рассматривать как положительный элемент состава. Цинк участвует в формировании защитной пленки, является ингибитором коррозии и используется в составах моторных масел как составляющая, улучшающая противоизносные свойства масел. Цинк является важной составляющей присадки ДФ–11, входящей в составы большинства моторных и трансмиссионных масел

Таблица 5 – Содержание цинка в консервационном масле К–17 и составе масла на основе очищенного отработавшего моторного масла

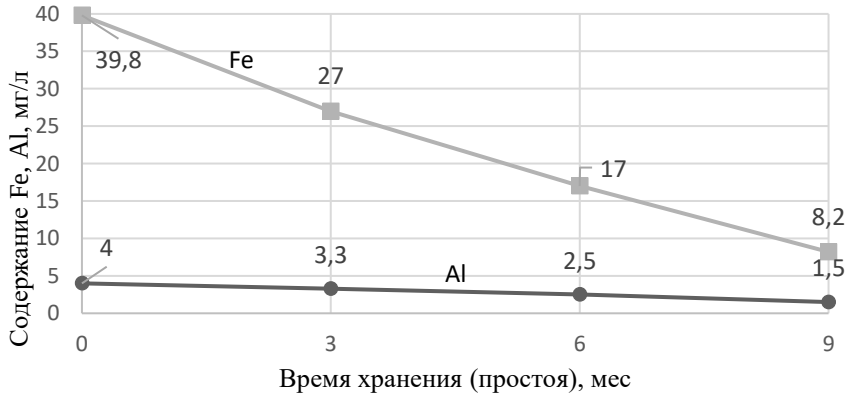
Наименование образца масла	Содержание цинка	
	мг/л	ppm
Масло К–17 (товарное)	4,4	4,8
Очищенного моторное масло М–10ДМ с добавками 6% полимеризованного рапсового масла и 6% ПВК	28,0	30,8

В большей степени представляет научный и практический интерес анализ изменения элементного состава масел по содержанию железа (Fe) и алюминия (Al) в период длительного простоя. Общеизвестно и логично, что по мере наработки содержание железа и алюминия в масле

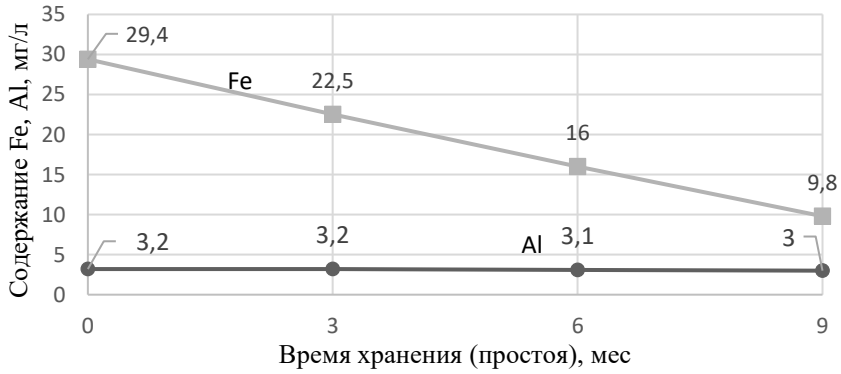
увеличивается. В период простоя техники происходит осаждение некоторой части металлических частиц (рисунок 2).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Изменение содержания металлов в моторном масле от времени хранения: а) комбайн № 1; б) комбайн № 2; в) комбайн № 3

Анализируя изменение содержания железа и алюминия после завершения периода эксплуатации комбайнов необходимо отметить раличия в количестве продуктов износа в масле и прежде всего железа. Наибольшее количество железа в масле обнаружено в двигателе комбайна №2 и наименьшее в двигателе комбайна №1. В процессе длительного простоя техники

наблюдается общая закономерность -снижения количества железа в масле. В данном случае происходит осаждение металлических частиц на дно картера двигателя. Однако при запуске двигателя часть частиц возвратится в состав масла. В зависимости от плотности осадка в картере с маслом, при сливе и замене масла на свежее не все загрязнения (металлические частицы) удалятся вместе с маслом. Часть их попадает в свежее масло, тем самым интенсифицируется процесс износа деталей цилиндро – поршневой группы.

Рассматриваемая разрабатанная технология консервации ДВС зерноуборочных комбайнов предусматривает очистку работавших моторных масел с последующим использованием в ДВС, что значительно снижает количество загрязнеий и не представляет угрозы при замене состава рабоче-консервационного масла на товарное моторное масло. Для продления сроков службы двигателей комбайнов и снижения износа рассматривалось содержание элементов износа (железа, алюминия) в масле после обкатки комбайна первого года эксплуатации в течение 50 часов, последующей работы комбайна в течение 150 часов и работы комбайна (той-же марки «Полесье» сроком эксплуатации более 10 лет) после 150 часов наработки.В таблице 6 представлены результаты определения содержания металлов в масле для этих комбайнов. Следует отметить, что в период уборочных работ комбайны работали в аналогичных условиях, на одинаковом по составу дизельном топливе и моторном масле М–10ДМ. С увеличением срока эксплуатации комбайна происходит ожидаемое увеличение содержания металлов износа.

Таблица 6 – Содержание частиц износа (железо, алюминия в моторном масле М–10ДМ)

Наименование образца масла	Железо		Алюминий	
	мг/л	ppm	мг/л	ppm
Масло М–10ДМ после обкатки в течение 50 часов в двигателе комбайна «Полесье» первого года эксплуатации	8,7	9,6	1,1	1,2
Масло М–10ДМ комбайна «Полесье» первого года эксплуатации после обкатки и последующей эксплуатации в течение 150 часов	10,5	11,6	1,0	1,1
Масло М–10ДМ комбайна «Полесье» более 10 лет эксплуатации после наработки 150 часов	18,1	17,8	2,6	2,9

В масле в процессе обкатки за период 50 часов работы на холостом ходу содержание железа приближается к периоду работы комбайна под нагрузкой в течение 150 часов.

В целом, обобщая полученные результаты по определению элементов продуктов износа в работавших в двигателях комбайнов моторных маслах, их осаждении в процессе хранения (простоя), следует сделать вывод о целесообразности замены масел перед постановкой на хранение.

Заключение. Представленные результаты применения атомно-абсорбционного метода анализа металлов износа (железо, алюминий, медь и хром) в моторных маслах показывают, что метод позволяет оценить эффективность применения промывочных и обкаточных масел, контролировать процесс очистки моторных масел и процесс изменения моторных масел в результате хранения сельхозтехники (комбайнов).

Список источников

1. Дунаев А.В. Масла как средство диагностирования машин и оборудования // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 6. С. 33-37.

2. Глущенко А.А. Диагностирование двигателя по содержанию продуктов износа в картерном масле // Изв. С.-Петерб. Гос. Аг. Ун-та. - 2015. № 41. С. 241-244.

3. Новиков Е.А., Кирюхин М.В. Анализ масел в процессе их эксплуатации. Неизведанная территория // Аналитика. – 2015. - №3 (22). – С.36 – 47.

4. Владимиров Д.И., Никоноров А.Н. Диагностирование дизелей по соотношению концентраций продуктов изнашивания в работавшем моторном масле // Евразийский научный журнал. - 2016. №10. С. 294-296.

5. Пелипасов О.В., Путьмаков А.Н. Анализ моторных масел с использованием спектрометра «Экспресс» и источника микроволновой плазмы// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. - №1(85). – С.91 – 95.

6. Кюрегян, С. К. Эмиссионный спектральный анализ нефтепродуктов [Текст] / С. К. Кюгерян. – М.: Химия, 1969. – 296 с.

7. Lundholm A. Determination of trace and major elements in oil by ICP-AES after microwave digestion // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. № 9. P. 112–117.

8. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М., Техносфера. 2009. 783 с.

9. Кацков Д.А. Одновременное определение элементов в атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2019 - №1(85). – С.5-17.

10. Остриков В.В., Афанасьев Д.И. Результаты исследований по разработке состава обкаточного масла на базе отработанного масла // Научное обозрение. - 2017. №1. С. 30 – 35.

References

1. Dunaev A.V. Oils as a means of diagnosing machines and equipment // Tractors and agricultural machines. 2015. No. 6. Pp. 33-37.

2. Glushchenko A.A. Engine diagnostics by the content of wear products in crankcase oil // Izv. S.-Petersburg State Ag. Un-ta. 2015. No. 41. Pp. 241-244.

3. Novikov E.A., Kiryukhin M.V. Analysis of oils during their operation. Uncharted territory // Analytics. – 2015. - №3 (22). – Pp.36-47.

4. Vladimirov D.I., Nikonorov A.N. Diagnostics of diesels by the ratio of concentrations of wear products in running engine oil // Eurasian Scientific Journal. 2016. No. 10. Pp. 294-296.

5. Pelipasov O.V., Putmakov A.N. Analysis of motor oils using an Express spectrometer and a microwave plasma source// Factory laboratory. Diagnostics of materials. – 2019. - №1(85). – Pp.91-95.

6. Kyuregyan, S. K. Emission spectral analysis of petroleum products [Text] // S. K. Kyugerian. – M.: Chemistry, 1969. – 296 p.

7. Lundholm A. Determination of trace and major elements in oil by ICP-AES after microwave digestion // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. No. 9. P. 112-117.

8. Pupyshev A.A. Atomic absorption spectral analysis. M., Technosphere. 2009. 783 p

9. Katskov D.A. Simultaneous determination of elements in atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization // Factory laboratory. Diagnostics of materials. – 2019 - №1(85). – Pp.5-17.

10. Ostrikov V.V., Afanasyev D.I. Results of research on the development of the composition of the running-in oil based on used oil // Scientific review. - 2017. No. 1. pp. 30-35.

Информация об авторах

В.К. Нагдаев – кандидат химических наук; В.В. Остриков – доктор технических наук, профессор; А.В. Кошелев – младший научный сотрудник; Д.Н. Жерновников – младший научный сотрудник.

Information about the authors

V. Nagdaev – Candidate of Chemical Sciences; V. Ostrikov - Doctor of Technical Sciences, Professor; A. Koshelev - junior researcher; D. Zhernovnikov - junior researcher.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 14.03.2023 Принята к публикации (Accepted): 26.04.2023