

**А.В. Дунаев<sup>1</sup>, В.Е. Тарасенко<sup>2</sup>, А.А. Жешко<sup>3</sup>**<sup>1</sup>ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Российская федерация<sup>2</sup>УО БГАТУ г. Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: azeshko@gmail.com

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАСЕЛ, КАК ОСНОВА УГЛУБЛЕННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ МАШИН

Спектральный анализ масел, выявляющий (в отличие от других методов диагностирования) динамику и причины интенсивного изнашивания узлов трения – это метод эффективного углубленного контроля агрегатов машин и единственный метод максимально раннего предупреждения о возможных неисправностях. Совокупность его с химмотологией – самый эффективный прием выявления причин повышенного изнашивания типовых узлов трения машин и оборудования [1-6].

Известно несколько методов спектрального анализа состава веществ, а также большое разнообразие приборов и установок для этого [1-5]. Но для контроля содержания продуктов изнашивания в маслах наиболее оптимальны зарубежные и отечественные установки эмиссионного (излучающего) анализа, в т.ч. специализированные квантометры от «СКБ СПЕКТР» [6].

В эмиссионном спектральном анализе определяется интенсивность испускания света возбужденными атомами вещества. Возбуждение обеспечивают сжиганием вещества в электрической дуге или испарением лучем лазера. Остывая, атомы веществ излучают кванты света индивидуального комплекса волн, из которых для контроля используют только по одной, наиболее информативной, длине волны в диапазоне 0,4–0,7 мкм.

Родоначальником такого анализа является Англия (1927 г), где в 60-х гг. было налажено производство спектрометров Hilger, а в конце 60-х гг. Этот анализ получил широкое применение в СССР [1-3].

Применению такого анализа масел для диагностирования автотракторных и транспортных дизелей с 60-х годов положили исследования ЦНИИ МПС [1] (ГОСТ 20759), ЦНИДИ, ГОСНИТИ [2], НАМИ [3], ВНИИ НП и МАДИ. В 80-х гг. этот анализ стал применяться в крупных АТП [6].

**Ключевые слова:** спектральный анализ масел, диагностирование машин.

**A.V. Dunaev<sup>1</sup>, V.E. Tarasenko<sup>2</sup>, A.A. Zheshko<sup>3</sup>**<sup>1</sup>FGBNU FNATS VIM, Russian Federation<sup>2</sup>UO BSATU Minsk, Republic of Belarus<sup>3</sup>RUE "Scientific and Production Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization"

Minsk, Republic of Belarus

e-mail: azeshko@gmail.com

Spectral analysis of oils, which, unlike other diagnostic methods, reveals the dynamics and causes of intensive wear of friction units, is a method of effective in-depth control of machine units and the only method for even early warning of possible malfunctions. And its combination with chemotology is the most effective method for identifying the causes of increased wear of typical friction units of machines and equipment [1-6].

There are several methods of spectral analysis of the composition of substances and a wide variety of devices and installations for this [1-5]. But to control the content of wear products in oils, foreign and domestic installations for emission (radiating) analysis are most optimal, incl. specialized quantum meters from SKB SPEKTR [6].

In emission spectral analysis, the intensity of the emission of light by excited atoms of a substance is determined. And the excitation is provided by burning the substance in an electric arc or by evaporation by a laser beam. Cooling down, the atoms of substances emit light quanta of an individual complex of waves, of which only one, the most informative, wavelength in the range of 0.4-0.7 microns is used for control. The ancestor of this analysis is England (1927), where in the 60s. the production of spectrometers "Hilger" was established, and at the end of the 60s. this analysis is widely used in the USSR [1-3].

The use of such an analysis of oils for diagnosing automotive and transport diesel engines since the 60s has been put forward by the studies of the Central Research Institute of the Ministry of Railways [1] (GOST 20759), TsNIDI, GOSNITI [2], NAMI [3], VNII NP and MADI. In the 80s this analysis began to be applied in large ATP [6].

**Keywords:** spectral analysis of oils, machine diagnostics

### Основная часть

В наше время проведены работы по спектральному анализу масел дизелей Д-243 на установке МФС-7М (многоканальной фотометрической системе МФС-7М) [7]. Установки МФС специализированы на анализе масел вязкости 6–30 сСт. При меньшей вязкости механические примеси из них осаждаются, а при большей – неравномерно поступают в прожиг. Химмотология может показать браковочное состояние масла, нецелесообразность его анализа, а при чрезмерной обводненности анализ не возможен вообще, т.к. масло в искре прожига как бы взрывается.

На рис. 1 и рис. 2 приведены составные части спектрофотометра или квантометра МФС-7М и принципиальная схема работы.



Рис. 1. Установка МФС-7М: слева у оператора источник дуги ИВС-29, правее камера для прожига масел, в центре – квантометр со вспомогательными приборами, справа - контроллер КМТ-1 и компьютер с программным обеспечением



Рис. 2. Принципиальная схема работы спектрофотометра МФС-7М

Спектральный анализ моторных, трансмиссионных масел без учета пробо- подготовки занимает 3–5 мин. Все работы химмотологического [8–15] и спектрального [1–6] контроля масел и диагностирования по их результатам дизелей включают: отбор 200–300 мл пробы масла с поддона двигателя после слива (50–100 мл) из него донной части. Далее одновременно определяется температура вспышки и обводненность масла, отдельно – щелочное число, диспергирующе-стабилизирующие свойства (ДСС) или моющие свойства, «капельная проба», загрязненность и вязкость.

Спектральный анализ масел на установках МФС с 70-х гг. неоднократно модифицировался [6]. Ныне он проводится подачей масла, налипаемого на кварцевый диск, на контактирующий с ним угольный электрод, на котором масло сгорает. Такая подача не позволяет контролировать все частицы примесей в маслах. Так в маслах с вязкостью 14 сСт по размеру абразивных частиц следует учитывать [6]:

частицы до 5 мкм, попадающие в дугу, для износа ДВС не значимы;

то же, 5–15 мкм – малозначимы для ДВС;

то же, 15–30 мкм, участвуют в изнашивании ДВС и попадают в дугу;

то же, 30–50 мкм и более, составляющие значительную долю самых опасных загрязнений, в дугу могут не попадать, а если попадают, то на фоне обычных показаний принимаются за случайные и как ошибки из анализа исключаются. Металлические частицы нормального, не аварийного изнашивания также имеют мелкие размеры. А при аварийном изнашивании крупные частицы также могут не попадать в анализ.

### Факторы изнашивания сопряжений деталей в моторных маслах

Комплексный (спектральный и химмотологический) анализ масел, адаптированный для инженерных служб АПК, позволяет выявлять факторы постепенно и предотвращать внезапную, из-за непредвиденных явлений, потерю рабочих свойств масел. Это следующие факторы [16–18]:

1. Постепенное снижение щелочного числа (ЩЧ) и вязкости масла.

2. Постоянное, хотя и неравномерное загрязнение масла из окружающей среды, а разжижение и обводнение из ДВС – случайно.

3. Накопление частиц металлов в маслах согласно динамике изнашивания узлов трения, а также по содержанию в маслах кремния, а отчасти и воды (рис. 3).

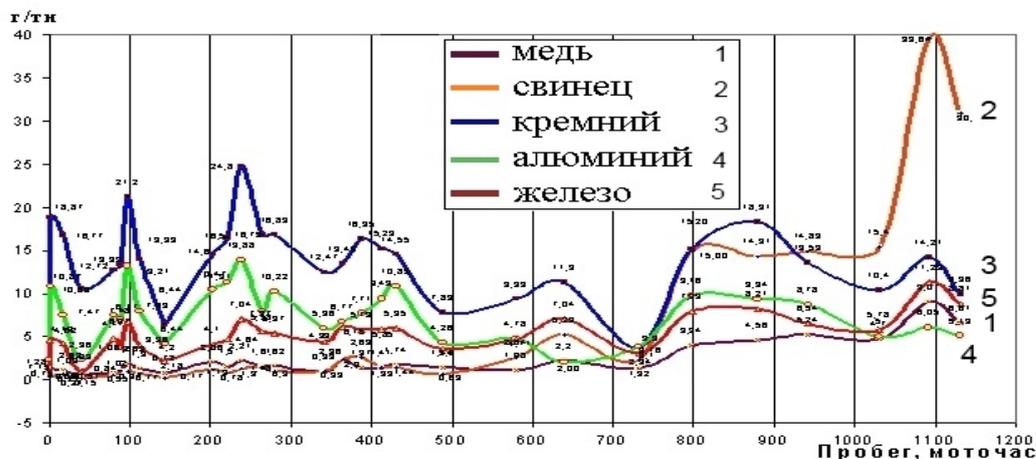


Рис. 3. Зависимости концентрации металлов от содержания кремния в масле CF-4 15W-40 по наработке дизеля: синяя линия – кремний; светло-оранжевая – свинец до 40 г/т из-за коррозионности масла и причины смены масла

4. В свежих и в работавших маслах возможны: значительная вариация рабочих свойств, а также коррозионность, повышающие износ ДВС до аварийного.

Комплексный контроль масел учитывает следующее:

1. Концентрации металлов резко увеличиваются с поступлением в масла грязи, пыли и воды (рис. 3); с очисткой системы смазки концентрации металлов значительно уменьшаются. В износе ЦПГ и КШМ доля абразивного изнашивания составляет более 60 % [7, 8, 11, 12, 15–19].

2. При исправной системе очистки масла концентрации примесей в масле занижаются, а по мере неисправности – повышаются.

3. Масла с высокими моющими свойствами как-бы завышают концентрацию примесей в маслах.

4. Нарушение нормальных условий работы ДВС, «рваные» нагрузочно-скоростные режимы искажают данные противоизносного состояния ДВС.

5. Вариация вязкости масел, разжижение топливом также ухудшают противоизносные свойства ДВС: в вязких маслах частиц износа меньше.

6. Долго работавшие масла повышают коррозионность к подшипникам ДВС, что не связано со снижением их износостойкости.

7. Снижение ЩЧ повышает общее изнашивание ДВС.

8. При аварийном изнашивании могут быть крупные частицы износа, не выявляемые спектроскопией: на установках МФС надежно выявляются частицы размером лишь до 30 мкм, поэтому нужен комплекс методов контроля.

9. При нормальном трении изнашиваются поверхностные пленки деталей, образованные, например, присадками. А появление в продуктах износа частиц металлов означает, что эти защитные пленки разрушены и происходит непосредственный контакт металлов трибопар. При этом могут образовываться крупные частицы износа, но спектроскопией они не выявляются.

Таким образом, спектрометрия может не показать повышенную концентрацию металлов в маслах при нестандартных трибологических условиях. Например, при аварийном изнашивании шатунных подшипников феррография регистрирует рост числа крупных частиц, а спектроскопия – не выявляет. Поэтому нужен анализ динамики накопления металлов в маслах несколькими методами с контролем их химмотологических показателей. Важно контролировать и форму, и размеры частиц износа, обусловленные разными процессами изнашивания.

Отсюда в комплексной технологии, при оценке результатов спектрального анализа масел, требуется учитывать концентрацию в них частиц кремния, воды, топлива, а также ДСС, ЩЧ и вязкость масла. Вывод об интенсивности износа ДВС следует делать только с повторным анализом после очистки ДВС или смены масла.

### **Нормы содержания металлов в моторных маслах машин**

Факторами нормирования концентраций металлов в маслах не аварийных дизелях являются такие показатели:

- эффективность работы системы очистки масла;
- наличие системы предпусковой прокачки подогреваемого масла;
- конструктивные параметры, определяющие износостойкость дизелей, мало меняющиеся в этом плане для модификаций основной марки ДВС.

Параметрами масел, определяющими содержание в них металлов, являются [1–8, 11, 12, 15–19]:

- снижение ДСС до минимума;
- содержание частиц кремния, имеющегося в свежих маслах до 5 *ppm*, а в работавших до 45 *ppm*: коэффициент корреляции содержания меди, свинца и олова от содержания кремния достигал 0,90. Содержания хрома, алюминия и железа – до 0,80, никеля и молибдена – до 0,75 [6];
- содержание воды, находящееся в свежих маслах до 0,08 %, а в работавших до 1,5 %, где в отдельных случаях выделяется «подтоварная вода»;
- щелочное число с градациями: 5–6, более 8 и со снижении до 3 мгКОН/г [16];
- снижение температуры вспышки ниже 150 °С [6];
- вязкость масла при 100 °С с градациями 6–8, 10–12, 13–15,5, 18–22 сСт и ее снижение к 4–6 сСт.

В условиях же СХП, в зимний период с малой запыленностью и малой загрязненностью дизеля, первично влияние снижения ЩЧ масла.

Изложенное показывает, что спектральный анализ нужно сочетать с химмотологическим контролем, хотя роль спектрального анализа – главная.

Нормы концентрации металлов: номинальные для новых и отремонтированных (обкатанных) дизелей, допускаемые при их ТО, предельные для безусловной смены масла и ревизии дизелей, устанавливают по таким химэлементам (табл. 1):

- *Fe, Al, Cr* – как показатели изнашивания ЦПГ ДВС отдельно по гильзе (*Fe*), поршням (*Al*) и компрессионным кольцам (*Cr*), хотя его поступление с износом хромового

покрытия колец прекращается. Анализ на причины повышенного изнашивания ЦПГ проводят с учетом концентрации в масле  $Si$ ;

- $Cu$ ,  $Pb$ ,  $Sn$  – то же для подшипников КШМ. Здесь дополнительно принимают во внимание «капельную пробу», загрязненность абразивами, обводненность и коррозионность масла, период работы дизеля (обкатка после изготовления, ремонта, когда концентрации  $Sn$  и  $Pb$  естественно повышены или была продолжительная эксплуатация). Повышенная концентрация  $Pb$  и  $Sn$  свидетельствует о повышенном изнашивании подшипников КШМ, а повышенная концентрация  $Cu$  свидетельствует об изнашивании уже основного тела подшипников, что является серьезной неисправностью;
- $Ni$ ,  $Mo$  – вспомогательные показатели интенсивности изнашивания зубчатых колес и подшипников качения в ДВС. В маслах с молибденовыми присадками диагностирование по  $Mo$  не возможно;
- $Si$  – один из самых тревожных параметров масла, т.к. загрязненность масла на 80 % обуславливает уменьшение ресурса ДВС [7, 11]. Предельным содержанием  $Si$  предложено 20–25 ppm [6]. Предотвращение и уменьшение загрязненности масел – значительное средство повышения ресурса машин и оборудования.

Все же спектральный и химотологический (в т.ч. по «капельной пробе») анализы масел, с учетом процесса проведения изложенных недостатков, очень эффективны. Их технологии, нормативы масел автотракторной техники (табл. 1), приемы выявления причин повышенного изнашивания и аварий дизелей с рекомендациями по их предотвращению отработаны [6, 7]. На их основе с соответствующими ТО и ТР доремонтный ресурс дизелей может быть увеличен не менее чем в 1,5 раза с полным исключением их аварий. Поэтому анализ масел должен быть повсеместным.

Т а б л и ц а 1. – **Примерные нормативы химотологических и спектральных параметров масел для автотракторной техники [6]**

Параметры масел	Нормативные значения параметров масел:											
	Моторных				Трансмиссионных				Гидравлических			
	Ном	Доп	Пред	ПЛ	Ном	Доп	Пред	ПЛ	Ном	Доп	Пред	ПЛ
Температура вспышки, °С	>205	>185	>170	170	По пасп.	90 %	80 %	-	По пас-порту	90 %	85 %	-
Содержание воды, %	Сле-ды	<0,15	< 0,3	0,5	сле-ды	<0,3	<0,5	-	сле-ды	<0,15	<0,3	-
Моюще-диспергирующие свойства, баллы	0	<3	<6	-	1-2	3-4	<6	-	-	-	-	-
Вязкость при 100 °С, в % к номиналу	По пас-порту	80-120	75-135	75-135	По пас-порту	90-130	80-150	-	По пас-порту	90-110	90-125	-
Вязкость при 50 °С, в %	-	-	-	-	“-	90-130	90-150	-	“-	90-110	90-125	-
Вязкость при 40 °С, в % к номиналу	-	-	-	-	-	-	-	-	“-	90-110	90-125	-
Щелочное число, мгКОН/г	>8	>5	>4	2	1 - 3	1 - 2	<0,5	-	-	-	-	-
Оптическая плотность, %	<0.15	< 1.5	< 2.5	-	0.15-0,40	< 2,5	< 3,5	-	<0,12	<0,18	<0,25	-
Содержание металлов, ppm:												
Fe (200)*	3-5	50	65	100	3-5	150	200	500	1-2	10-15	15-20	75
Cr (30) *	0,3	3,5	5,5	25	0,5	5-10	25	10	0,5	1	5	10
Al (200)*	2	15	25	30	3	5	15	100	2	5	15	50
Si (200)*	3-5	20	25	20	3	35	50	40	1-2	5	10	-
Pb (200)*	0,5	5	15	40	-	-	-	300	0,5	1	2	20
Cu (200)*	-	10-15	20-25	50	-	30	50	300	-	3-5	15	50
Sn (30)*	-	1,5	2,0	25	-	1	2	20	-	1	2	10
Ni (30)*	-	1,5	1,8	10	-	15	25	20	-	1,2	2	5
Mo (30)**	-	1,5*	2,0*	-	-	5	15	-	-	1	1,5	-

Примечания: ПЛ - браковочные нормы, соответствующие аварийному состоянию автомобилей по данным фирмы Лубризол; \*- пределы измерения установкой МФС-7М; \*\* - значения для масел без присадок с молибденом; регулярный (через 25-50 ч) анализ позволяет предупреждать наступление повышенного изнашивания ДВС, устанавливать предельные концентрации несколько большими и тем самым полнее использовать эксплуатационный ресурс машин и оборудования.

### Дополнительные методы анализа масел

Спектральный и химмотологический анализы дополняют инфракрасным молекулярным для углеводородов масел и феррографией частиц износа.

Феррография – магнитное осаждение частиц износа из проб масел. Ею определяют вид, форму, размер, материал частиц износа, наличие примесей и продуктов деструкции масла, а по ним определяют интенсивность и режимы трения, место отказа, степень его опасности.

Например, для задира характерны удлинённые частицы; усталостным разрушениям при трении качении – сферические частицы; при другом усталостном выкрашивании образуются хлопьевидные частицы и на их поверхности появляется множество микроязвин. Коррозионному износу характерно множество частиц размером до 2 мкм, а при микрорезании видна стружка.

Комплексный анализ масел позволяет точнее определять время их смены, предотвращая раннее или позднее проведение ТО, сохранить и значительно повысить заданный эксплуатационный ресурс, особенно изношенных машин и оборудования.

Альтернативой спектральным установкам может служить портативный «Ферро-индикатор ФЧМ-П» (рис. 4) для оперативного определения общей концентрации ферромагнитных частиц износа в маслах. Особенно он пригоден для диагностирования зубчатых передач, ЦПГ ДВС. Однако нормативы и технология его применения требуют апробации. Пока не совсем ясна его актуальность для контроля гидросистем с гидравлическими жидкостями с малой вязкостью.



Рис. 4. Прибор ФЧМ-П контроля содержания ферромагнитных частиц в маслах

### Управление техническим состоянием автотракторных ДВС по результатам их диагностирования на основе анализов масел

Управление надежностью машин в АПК проводится на основании планомерного ТО и ремонта машин по результатам диагностирования [20, 21]. А основными факторами изнашивания ДВС, которые необходимо учитывать для эффективного управления их ресурсом и надежностью, являются:

- по ЦПГ – динамика поступления абразивных примесей во впускной воздушный тракт и их размол при работе ДВС;
- по КШМ – динамика загрязнения масла через сапун, заливную горловину, отверстие под масломерный щуп, через открытые при ТО и ремонте поверхности ГРМ и ЦПГ, а также динамика коррозионности масла к цветным металлам, зависящая от состава масла и особенностей его старения в ДВС;
- по КШМ динамика обводнения масел и потери ими рабочих свойств (снижение щелочного числа, уменьшение концентрации активных добавок, снижение антиизносных свойств, а также вязкости при разжижении топливом).

А для моторных масел обоснованы следующие браковочные показатели [6, 7]:

- содержание кремния более 25 ppm;
- содержание свинца более 10 ppm при содержании кремния не более 10 ppm;
- снижение ЩЧ до 2,5–3 мгКОН/г, увеличение показателя ДСС до предела;

- содержание воды более 0,3 % или два потрескивания на 1 мл масла при контроле температуры вспышки;
  - температура вспышки ниже 175 °С;
  - изменение вязкости более чем на 40 % от паспортного номинала.
- Обоснованы такие показатели необходимости ремонта автотракторных дизелей в АПК:
- интенсивность изнашивания ЦППГ при концентрации металлов: **Fe > 65, Cr > 5,5, Al > 25 ppm**, но при содержании кремния в масле менее 10 ppm;
  - интенсивность изнашивания КШМ при концентрации металлов: **Cu > 25, Pb > 15, Sn > 2 ppm**, но при содержании кремния в масле менее 10 ppm;
  - интенсивность изнашивания зубчатых передач и подшипников в ДВС при концентрации металлов: **Ni > 1,8 %, Mo > 2,0 %**;
  - угар масла более 4,0 % для ранних и более 3,5 % для современных ДВС;
  - четко определяемый, яркий синий цвет ОГ.

В соответствии с приведенными нормативами (табл. 1) по результатам анализа масел необходимо определить наличие его браковочных показателей, т.е. тех параметров, значения которых достигли или превысили предельные значения. Далее необходимо выявить имеется ли зависимость повышенного содержания металлов от наличия в масле повышенного содержания кремния, воды, пониженных ЩЧ, вязкости и температуры вспышки.

В случае превышения норм воды, кремния, а также понижения температуры вспышки, ЩЧ, ДСС – следует рекомендовать срочную смену масла. Указывается причина брака масла, рекомендуется выявлять и устранять соответствующие неисправности ДВС.

Если моторное масло бракуется по повышенному содержанию воды, пониженному ЩЧ и ДСС, то оно для дизелей бракуется безвозвратно, т.к. владельцам машин восстановить свойства моторного масла невозможно. Но после недельного отстаивания нагретого масла, удаления из него воды и шлама – возможно повторное использование в других агрегатах, менее требовательных к маслам.

Если в масле нет заметного количества воды и топлива, ЩЧ более 4 мгКОН/г, а продукт бракуется только по содержанию кремния, то рекомендуется аналогичный отстой для повторного анализа, а при последующем благоприятном анализе – повторное использование.

Если отбраковка происходит по повышенному содержанию свинца или меди с оловом, при нормальном содержании кремния и нормальных других показателей, то рекомендуется смена марки, а бракуемое масло можно использовать в агрегатах без цветных металлов.

Если в масле значительное содержание меди при незначительном содержании свинца, олова и воды, то сообщается о неисправностях системы охлаждения.

Все же иногда не следует делать заключение об аварийном состоянии ДВС по однократно выявленному повышению концентраций металлов. Иногда это может быть временным и если сопряжения трения значительно не повредились, то при дальнейшей работе они могут приработаться, и износ не будет прогрессировать. В некоторых случаях бывает достаточным сменить масло и показания нормализуются. Повышенное содержание кремния может быть следствием ошибок при заборе пробы и проведении анализов.

### **Заключение**

Начало аварийного изнашивания ДВС по результатам анализа масел выявить несложно, т.к. при этом резко ухудшаются все показатели масел, и повышается концентрация многих металлов. Труднее выявить состояние ДВС при нормальных анализах масел. Здесь решение о ремонте ДВС принимается по комплексу доступных ПРМ, а также по технико-экономическим критериям: по достижению минимума суммарных издержек на использование ДВС или при достижении за эксплуатацию ДВС затрат на запчасти к стоимости самого ДВС.

При уверенном освоении спектрального и других анализов масел, когда концентрации металлов, постепенно увеличиваясь от анализа к анализу, приближаются к предельным значениям с одновременным ростом угара масла, расхода картерных газов, дымности ОГ, расхода топлива, падению давления наддува и уменьшению мощности дизеля, то службе ТО и ТР сообщается о наступающем израсходовании моторесурса дизеля без расчета технико-экономических показателей.

Технико-экономическая эффективность спектрального анализа безусловна. При предотвращении ускоренного изнашивания, аварий, преждевременной смены масла с существенной годовой экономией на энергонасыщенный трактор или комбайн, когда показатель годового обслуживания достигает 250 машин, – срок окупаемости лаборатории спектрального и

химмотологического анализа масел один год. При обслуживании импортных машин эффективность работы лаборатории увеличивается пропорционально росту их стоимости, а срок окупаемости в этой пропорции снижается.

#### Список использованных источников

1. Чанкин, В.В. Методы оценки состояния тепловозных двигателей экспрессным спектральным анализом масла : автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.08.05. – М. : 1972. – 299 с.
2. Петросян, П.Ш. Исследование износа и возможности оценки технического состояния двигателей тракторов с применением метода спектрального анализа : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. Наук : 05.20.03. – Саратов, 1973. – 18 с.
3. РД 37.001.019-84 Методика диагностирования технического состояния ав-томобильных двигателей по показателям масла. – М. : НАМИ, 1984. – 23 с.
4. ГОСТ 20759-90 Дизели тепловозов. Техническое диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса методом спектрального анализа масла. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 24 с.
5. Гергель, У. Периодичность замены дизельных масел. Корпорация «Лубризол». Доклад на 2-й международной конф. по проблемам разработки, производства и применения смазочных материалов. – Бердянск : 06.09.97. – 51 с.
6. Дунаев, А.В. Опыт нормирования и контроля качества моторных масел с использованием установки МФС-7М. – Горный журнал, 2008. – № 2. – С. 69–73.
7. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В. П. Миклуш [и др.] ; Минсельхозпрод РБ, УО "БГАТУ". – Минск : БГАТУ, 2019. – 392 с.
8. Большаков, Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. Изд. 2-е, переработанное. – Ленинград: Недра, 1982. – 350 с.
9. ГОСТ 8581-78 Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.
10. ГОСТ 23652-79 Масла трансмиссионные. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 16 с.
11. Григорьев, М.А., Бунаков, Б.М., Долецкий, В.А. Качество моторного масла и надежность двигателей. – М. : Издательство стандартов, 1981.– 232 с.
12. Резников, В.Д. Шипулина, Э.Н. Критерии работоспособности моторных масел.– М. : Химия и технология топлив и масел, 1989. – № 9. – С.29–34.
13. ГОСТ 28365-89 (СТ СЭВ 6397-88) Реактивы. Метод бумажной хроматографии. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1990. – 11 с.
14. ГОСТ 25549-90 Топлива, масла смазки и специальные жидкости. Химмотологическая карта. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1990. – 14 с.
15. Арабян, С.Г. и др. Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
16. Дунаев, А.В. Выявление неисправностей двигателей внутреннего сгорания. Сельский механизатор, 2013. – № 10. – С. 38–41.
17. Дунаев, А.В. Диагностирование двигателей внутреннего сгорания и планирование их ремонта на основании качественных признаков технического состояния. – М. : Труды ГОСНИТИ, 2013. – Т. 112, ч. 1. – С. 172–177.
18. Матвеев, А.С. Влияние загрязнения масел на работу гидроагрегатов. – М. : Россельхозиздат, 1976. – 48 с.
19. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 144 с.
20. ГОСТ 20793-2009 Тракторы и машины сельскохозяйственные. Техническое обслуживание. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 19 с.