

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко², В. Д. Буслаев¹

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: trs9@yandex.by

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МАСЛА АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Аннотация. Представлены результаты анализа этапов развития и функциональных возможностей систем встроенного контроля износа пар трения автотракторных двигателей, в основе которых лежит мониторинг наличия ферромагнитных и диамагнитных частиц посредством индуктивной катушки. Приведены результаты углубленного лабораторного анализа моторного масла тракторного дизеля с использованием оптико-эмиссионного спектрометра.

Ключевые слова: двигатель, масло, износ, система контроля, мониторинг феррочастиц, датчик, индуктивная катушка.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshka², V. D. Buslaev¹

¹EI “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: trs9@yandex.by

²RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

MONITORING THE OIL CONDITION OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR ENGINES AT THE PRESENT STAGE

Abstract. The article presents the results of an analysis of the development stages and functional capabilities of integrated wear monitoring systems for friction pairs in automotive and tractor engines. These systems are based on monitoring the presence of ferromagnetic and diamagnetic particles using an inductive coil. The results of an in-depth laboratory analysis of tractor diesel engine oil using an optical emission spectrometer are also presented.

Keywords: engine, oil, wear, control system, ferroparticle monitoring, sensor, inductive coil.

Введение

Рабочие показатели масел являются комплексными диагностическими признаками технического состояния агрегатов машин и оборудования для выявления причин повышенной интенсивности их изнашивания [1]. А смазочное действие – один из способов управления надежностью машин и оборудования [1, 2]. В связи с этим важным является совершенствование методов контроля масел и обоснование нормативов их состояния.

Работа поршневых колец и гильз цилиндров происходит в условиях высоких удельных давлений и температур при ограниченной смазке трущихся поверхностей [3, 4]. При этом температуры верхнего поршневого кольца находятся в пределах 250–420 °С и 200–260 °С – гильзы цилиндра в районе верхней мертвой точки (ВМТ), удельные давления поршневых колец на гильзу (цилиндровую втулку) составляют 2,5–3,5 МПа [3, 5]. В таких условиях микрочастицы износа трущихся поверхностей прирабатываемых деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) постоянно

взаимодействуют с моторным маслом, играющим роль смазки и притирочной среды. При движении поршня вниз в подпоршневой области цилиндра большая часть смазочного масла с частями износа деталей ЦПГ удаляется со стенок цилиндра в картер [3].

Основным материалом компрессионных колец является серый чугун. С помощью различных способов литья, легирования и термической обработки чугуна добиваются необходимых свойств поршневых колец. Для форсированных дизельных двигателей применяются поршневые кольца из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, а также стальные хромированные компрессионные кольца и дорогостоящие марки аустенитного чугуна и нержавеющей стали (типа X12M) [6].

Большинство моделей дизельных двигателей имеют компрессионные поршневые кольца, изготовленные из высокопрочного чугуна с пределом прочности 1300–1700 МПа, с износостойким покрытием. На 63 % моделей в качестве износостойкого покрытия используют хром, на 32 % – молибден и на 5 % – плазменное напыление [7].

Основная часть

Производителями мобильной техники и автотракторных двигателей (АТД) сформированы программы фирменного технического сервиса. Для анализа технических жидкостей рекомендован и регулярно осуществляется плановый отбор проб моторного масла, анализ результатов которого определяет интервалы его замены на основе браковочных норм и тенденций изменения состояния, установленных для конкретного двигателя. Также предусматривается проверка масла на наличие загрязнений для последующего анализа состояния двигателя, выявления недостатков в его техническом обслуживании и первых признаков чрезмерного износа. Так как условия эксплуатации АТД могут серьезно влиять на тип и степень загрязнения масла, то интервалы отбора проб зависят от двигателя и условий его эксплуатации, а оценка проб масла включает анализ продуктов износа, определение состояния масла. Анализ продуктов износа позволяет отслеживать скорость износа деталей путем обнаружения и измерения концентрации продуктов износа, содержащихся в масле. Исходя из известных данных о нормальной концентрации, устанавливаются предельно допустимые концентрации продуктов износа. После трехкратного отбора проб масла можно построить графики изменения содержания различных продуктов износа для конкретного АТД. Отклонение этих графиков от установленных нормальных значений позволяет выявлять приближающиеся неисправности.

Достаточно эффективным индикатором наличия продуктов износа в масле выступает индуктивная катушка, которая физически «видит» металлические частицы и разделяет их на два класса: ферромагнитные (сталь, чугун) и проводящие неферромагнитные (медь, алюминий, аустенит). Ферромагнитные частицы, попадая в зону поля катушки, повышают локальную магнитную проницаемость, из-за чего меняется индуктивная составляющая сигнала (катушка регистрирует импульс как изменение индуктивности). Неферромагнитные проводящие частицы, попадая в зону поля катушки, не изменяют магнитную проницаемость, однако они также возбуждают вихревые токи, которые увеличивают потери энергии магнитного поля катушки (катушка регистрирует импульс как рост потерь энергии).

Известна малогабаритная система встроенного контроля «АИДА» [8] для определения степени износа кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и ЦПГ АТД в режиме реального времени и прогнозирования их остаточного ресурса. Диагностическими признаками в данном случае являются концентрация, размер и материал продуктов износа. Они позволяют определить возможные места и стадии износа, а изменение концентрации показывает интенсивность развития неисправностей. При этом происходит осаждение из масла продуктов износа (Fe, Pb, Sn) в рабочий объем датчика с определением их состава и массы электронным блоком. Данная система имеет высокую чувствительность (около 0,0001 г массы частиц износа в рабочем объеме датчика), большой диапазон регистрации металлов и сплавов и высокую надежность.

Известно устройство для контроля износа пар трения [9], включающее стакан из немагнитного материала с охватывающей его индуктивной катушкой, регистрирующий прибор и термо-

датчик, установленный в стакан из немагнитного материала. Для определения ферромагнитных и диамагнитных частиц металла катушка выполнена в виде колебательного контура, частота которого обратно пропорциональна индуктивности катушки, емкости параллельно включенного конденсатора и напряжению питания самого контура. Термодатчик используется для измерения температуры внутри маслопровода с целью программной коррекции результатов измерений.

Данное устройство позволяет повысить чувствительность и точность контроля износа пар трения, изготовленных из ферромагнитных и цветных металлов, исключить влияние температуры смазочного материала и может быть использовано как для трибодиагностики АТД, так и для диагностики иных агрегатов, турбин, редукторов, компрессоров, гидравлических систем, а также отдельных деталей и узлов машин. Это позволит: своевременно получить информацию о возникновении износных отказов и предупреждать аварийные ситуации; максимально использовать ресурс работы, заложенный в машину, увеличить межремонтные сроки и контролировать качество проведения ремонта, что в конечном счете, приводит к сокращению затрат времени и труда, а также к уменьшению расхода запасных частей; научно-обоснованно назначать сроки замены масла в системе смазки машин, подобрать оптимальный смазочный материал для конкретных пар трения; повысить качество и культуру обслуживания.

Описываемое устройство позволяет фиксировать изнашивание сопряжений АТД, но какого-либо управляющего воздействия на работу АТД не оказывает. Недостатком его также является нерациональное расположение датчика контроля износа пар трения.

Авторы патента, связанного с анализом ферромагнитных частиц в масле, отмечают: «Имеются технические решения, напрямую использующие для анализа частиц их ферромагнитные свойства. Последние влияют на индуктивность охватывающей объем масла электрической катушки, являющейся составной частью колебательного контура» [10].

В патенте, связанном с обнаружением частиц металла в системе смазки и определения его вида, описывается способ обнаружения неферромагнитных частиц так: «Прохождение немагнитной частицы металла с высокой электропроводностью (медь, латунь, бронза) в плоскости чувствительного элемента связано с возникновением вихревых токов в объеме частицы металла, которые создадут вторичное электромагнитное поле (ЭМП), противодействующее ЭМП чувствительного элемента от тока. В идеальном случае поле частицы металла полностью компенсирует первичное поле в области поверхности чувствительного элемента, покрываемой частицей металла. В результате магнитный поток чувствительного элемента уменьшится на некоторую величину» [11].

В опубликованных исследованиях описываются методы определения размера частиц металла в масле [11]. Так, например, в ранее цитированном исследовании отмечается: «С измерительной цепи выходной сигнал поступает в блок обработки данных, в котором формируется информация о числе и типе частиц металла, а также на основе вероятностного подхода относят обнаруженную частицу металла к одной из размерных групп».

Несколько углубившись в изучение данного направления контроля, следует отметить, что прообразом системного мониторинга феррочастиц в масле можно считать *магнитные пробки*, используемые в редукторах и картерах, начиная с 1930-х гг. При этом магниты на сливных пробках в нижних точках картера собирают стружку, которую мастер-диагност оценивает при очередном ТО. Позже добавили самоуплотняющиеся адаптеры для извлечения без слива масла [12–14].

Более поздним прообразом (с конца 1960-х гг.) явились *магнитные ловушки* (магнитные стержни, вставки) в возвратных линиях и корпусах фильтров. Такие ловушки собирали ферромагнитные частицы до попадания в фильтрующую среду или на ее поверхности. По регламенту мастер-диагност извлекал стержень/кассету и визуально оценивал количество и характер частиц (иногда одновременно контролируя перепад давления на фильтре) [15].

В авиации, начиная с 1970-х гг., известно применение *магнитных чип-детекторов* (пробок с магнитом и электрической цепью индикации). Их устанавливают в потоке масла на «обратке». Принцип работы: пробка-датчик с постоянными магнитами и двумя электродами образует небольшой зазор между электродами. Датчик включен в электрическую цепь индикации. Маг-

ниты притягивают ферромагнитные частицы из масла. Накопление продолжается, пока частицы не замкнут цепь, образовав проводящий мостик в зазоре, – тогда срабатывает индикация на панели. Факт замыкания цепи рассматривается как ранний индикатор износа шестерен и подшипников [16–18].

На примере патента [19] можно изучить комбинированную схему, принципы которой применяются и сегодня: классическое улавливание частиц *постоянным магнитом* сочетается с *индуктивной катушкой*, намотанной вокруг магнита. Магнит удерживает ферромагнитные частицы, а катушка измеряет изменение индуктивности среды с учетом того, что частицы находятся не во взвешенном, а сконцентрированном состоянии в зоне поля. Такой подход, за счет концентрации частиц в области измерения, снижает требуемую чувствительность датчика.

Для измерения размеров и концентрации металлических частиц был предложен вихретоковый преобразователь (ВТП), состоящий из нескольких катушек. Возбуждающая катушка создает переменное магнитное поле, а пары измерительных – регистрируют его изменение при пролете частиц [20]. По сравнению с одиночной катушкой, симметричное размещение нескольких измерительных катушек относительно канала делает анализ более устойчивым. Устройство работает в двух режимах: первый режим – ориентировочного определения счетной концентрации частиц в жидкости и подключения к усилителю оптимального числа измерительных катушек (в зависимости от концентрации); второй – режим раздельного определения размеров и счетной концентрации металлических частиц [20].

Следует отметить еще одну конструкцию *индуктивной катушки*, выполненную в виде *сетчатого экрана* в потоке, который совмещает две функции – первичное физическое улавливание частиц и последующую индуктивную диагностику с помощью токопроводящей части экрана [21].

Постепенное усложнение средств привело к тому, что современные индуктивные системы существенно развились в отличие от ранних решений: помимо катушек, они используют успокоители потока, встроенные датчики температуры/давления и реализуются как сквозные или байпасные узлы с нормированными присоединениями и цифровыми интерфейсами. Такая конструкция обеспечивает более точный счет частиц, разделение Fe/NFe и размерные категории, однако требует места и стабильного потока.

В настоящее время наибольшее распространение исследуемые системы получили в крупных двигателях, трансмиссиях и промышленных установках: двигатели морских судов; газотурбинные двигатели и маслосистемы ТЭС/ГПУ; редукторы и коробки передач ветроэнергетических установок; трансмиссии карьерных самосвалов и буровых установок горнодобывающей отрасли; гидротрансформаторы и редукторы крупной строительной техники. Производители исследуемых систем технически допускают их установку на АТД и трансмиссии более легкой техники, однако на практике такие решения встречаются главным образом в виде точечных внедрений (испытательные стенды, опытные парки).

Современные системы можно разделить на два варианта исполнения. Первый – с несколькими катушками (чаще одна измерительная и две возбуждающие), позволяющими регистрировать возмущение магнитного поля при прохождении частиц через чувствительную зону. Второй – с катушкой в сочетании с постоянным магнитом, который сначала концентрирует ферромагнитные частицы на своей поверхности, после чего катушка оценивает изменение индуктивности, пропорциональное накопленному материалу.

Среди датчиков первого исполнения известны интегрируемые в обходной вспомогательный контур DM4500 (Poseidon Systems) и MWDS (Parker Kittiwake), а также интегрируемый в основной контур MS4000 (Gastops). Работают по схожему принципу: одновременно анализируют Fe/NFe, выдают распределение по размеру и общий счет – и именно этот принцип обеспечивает ключевое преимущество по информативности перед накопительными решениями [22–26].

Среди датчиков второго исполнения, получивших наибольшее распространение, выделяется OPCom FerroS (ARGO-HYTOS). Он работает по описанному ранее принципу, однако дополнительно стоит отметить функцию автоматической очистки: посредством компенсации поля постоянного магнита (размагничивания) частицы отделяются от торца и уносятся потоком масла, что поддерживает непрерывность измерений. Как указывает производитель, по временным ин-

тервалам между циклами очистки можно оценивать степень износа. Чувствительность таких датчиков выражается не в микрометрах, а в суммарном количестве ферромагнитного материала на магните, обычно как процент заполнения или в условных единицах [27, 28].

Выбор между поточными и накопительными решениями определяется задачами контроля: поточные обеспечивают большую информативность, а накопительные дают простую и чаще более экономичную оценку по ферромагнитному материалу (занятость, интервалы между самоочистками) при более мягких требованиях к точке установки и условиям среды.

Решение задачи снижения габаритов диагностической системы возможно посредством разработки и внедрения более рациональных схем намотки катушки индуктивности. Это демонстрируется в относительно новом российском патенте [29], в рамках которого предложено фиксировать наличие металлических частиц в трансмиссионном масле с использованием планарной катушки Тесла.

Комплексные исследования образцов свежих и отработанных масел позволили разработать интеллектуальные алгоритмы оценки состояния масла (ОСА), которые способны определять его состояние на основе параметров, непосредственно измеряемых в масле (динамическая вязкость, плотность, диэлектрическая проницаемость, проводимость, уровень масла, температура). При этом используются новые комбинированные пьезоэлектрические датчики (на основе монокристаллического кварца), основным элементом которых является камертон, так называемые *камертонные датчики* [30]. Electroдами со всех сторон поверхности вызывают периодическую и упругую деформацию материала корпуса под воздействием электрического переменного напряжения. Эта вибрация создает электрический переменный ток, который течет через электроды. Электрический импеданс, рассматриваемый как соотношение между возбуждающим переменным напряжением и результирующим переменным током, является функцией, зависящей от стимулирующей частоты, свойств упругого материала, гидродинамических свойств поверхности датчика и свойств окружающей среды. Для измерения механического демпфирования и массовой нагрузки камертона, колеблющегося в масле, этот резонатор работает в диапазоне его резонансной частоты. Благодаря выбранной конструкции эта частота у рассматриваемого датчика расположена в нижнем диапазоне (кГц). Несмотря на объемные колебания камертона, амплитуда которого составляет около 100 нм, он устойчив к внешним возмущениям, таким как механические вибрации, удары по креплению датчика или акустический шум, благодаря особой сбалансированной конструкции.

Для анализа изменения резонансной кривой используется электромеханическая модель. Комплексный импеданс изгибных резонаторов (например, датчика камертона) можно смоделировать с помощью эквивалентной электрической схемы [30]. Формулы модели содержат переменные: динамическая вязкость η , удельная плотность ρ , диэлектрическая проницаемость ϵ и электрическая проводимость σ окружающей среды. С помощью алгоритма нелинейной оптимизации эти параметры вычисляются и дают прямую информацию о параметрах физического состояния.

В отличие от общепринятых концепций и алгоритмов оценки состояния масла (к маслу предъявляют несколько очень важных, сложных в контроле требований и показателей, не поддающихся инструментальному контролю) благодаря последним разработкам стало возможным за счет интеграции всей системы аппаратного и программного обеспечения управления состоянием масла мобильных машин более конкретно и точно адаптировать интервалы технического обслуживания и замены масла к двигателю машины и режиму его эксплуатации.

Существенным преимуществом рассмотренного алгоритма определения состояния масла с использованием пьезоэлектрических датчиков является многомерный анализ его параметров [31], при котором они нелинейно комбинируются для прогнозирования состояния масла. Таким образом, можно определить важные свойства масла, такие как содержание сажи, воды или разбавление дизельного топлива. Однако данные алгоритмы и технические средства не позволяют определять места и стадии активного изнашивания деталей двигателя, так как в масле не ведется учет продуктов износа (железо, алюминий, хром, медь, свинец, олово, кремний, никель, молибден, титан, калий, магний, кальций и др.) с определением их состава и массы электронными средствами. Не осуществляется контроль интенсивности развития неисправностей.

LAB CONTROL NUMBER	SAMPLE DATE	PROCESS DATE	EQUIPMENT METER	METER ON FLUID	FLUID CHANGED	MAKE UP FLUID	MAKE UP FLUID UNITS	FILTER CHANGED
V27U-54010-0016	08.01.2024	10.01.2024	0 HR	0 HR	U	0.0	L	U
Monitor Cumachlor	Уровень железа повышен, возможен повышенный износ деталей кривошипа. В пробе присутствует топливо всего 5,81%, необходимо осмотреть топливные линии и уплотнения форсунок. В пробе присутствует вода. Устраните источник загрязнения. Других проблем согласно пробе нет. Проведите повторный отбор пробы через 1-2 установившиеся часа работы двигателя (по возможности).							

Wear Metals (ppm)	Cu	Fe	Cr	Al	Pb	Sn	Si	Na	K	B	Mo	Ni	Ag	Ti	V	Sb	Cd	Cs	Mg	Zn	P	Ba
V27U-54010-0016	4	37	1	7	0	1	9	2	1	5	1	0	0	0	0	0	0	2035	5	523	619	0

OIL Condition / Particle Count (ct/mil)	ST	OXI	NIT	SUL	W	A	F	PFC	V100	TBN
V27U-54010-0016	11	9	9	17	P	N	T	5.81	10.31	3.1

Ag = Silver, Al = Aluminum, B = Boron, Ca = Calcium, Cr = Chromium, Cu = Copper, Fe = Iron, P = Phosphorus, K = Potassium, Mg = Magnesium, Mo = Molybdenum, Na = Sodium, Ni = Nickel, Pb = Lead, Si = Silicon, Sn = Tin, V = Vanadium, Zn = Zinc
A = Acidbase, F = Fuel, W = Water, P = Positive, N = Negative, T = Trace, E = Excessive, NIT = Nitration, OXI = Oxidation, ST = Soot, SUL = Sulfation, ISO = ISO Rating, PFC = Percent Fuel Content, PG = Particle Counting Index
ISO = ISO Rating, TAN = Total Acid Number, TBN = Total Base Number, HSD = Karl Fisher result, V100 = Viscosity@100C, V40 = Viscosity@40C, FDM = Ferosol Debris Monitor
Notice: This analysis is intended as an aid in predicting mechanical wear. No guarantee, expressed or implied, is made against failure of this piece of equipment or a component thereof.

Результаты лабораторного анализа моторного масла (итоговый протокол)

Одним из важнейших критериев оценки качества масла считают интенсивность изнашивания подшипников коленчатого вала, цилиндров и поршневых колец. Для оценки износа в цилиндрах применяют датчики с различными чувствительными элементами. Для оценки задиоров поршня используют датчик, состоящий из двух термопар. Для контроля зазора между цилиндром и рабочей поверхностью применяют индуктивный датчик, позволяющий выявить поломку или залипание колец.

Таким образом, существует необходимость в определении методов прогнозирования технического состояния сопряжений АТД, которые бы использовали гибкий инструментарий, способный периодически самообучаться на протяжении всего периода эксплуатации и тем самым учитывать комплексное влияние факторов, определяющих скорость изнашивания сопряжений.

Современным и наиболее достоверным методом выступает анализ масел с использованием оптико-эмиссионного спектрометра, в котором происходит сгорание предварительно пробы масла при большой температуре (700 °C) и последующее позиционирование пламени на детекторе с передачей данных измерения на компьютер. Данный метод показывает поэлементно как продукты присадок, так и частицы металла (22 элемента). С целью ознакомления с возможностями описанного метода выполнен анализ моторного масла М-10Г₂ дизеля Д-260.1 (наработка масла составила порядка 125 ч) трактора «Беларус-1523» в специализированной лаборатории. Результаты анализа представлены на рисунке.

Заключение

Как следует из итогового протокола (рисунок), в пробе масла наблюдается повышенное накопление частиц железа. Исходя из значений нагрузки на двигатели данного диапазона мощности в составе трактора, это обстоятельство можно считать нормой. Присутствуют элементы сигнализации возможного попадания (передозирования) топлива или ухудшения подачи чистого воздуха – повышенное содержание сажи 11 ед. (30 ед. – предельно, сажа провоцирует повышенный износ деталей). Содержание топлива в масле – 5,81 %, выше рекомендованного предела (4 %). Падение вязкости моторного масла – 10,31, допустимо снижение не более трех единиц от базового (обычно составляет 14 ед.). Кислотное число (TBN) по данным анализа составило 3,1, что граничит с пределом снижения по допуску. В соответствии с нормативами не рекомендуется снижение ниже 50 % от базового, у Caterpillar было 14 единиц. По данным итогового протокола следует сделать вывод, что по двум последним случаям целесообразна замена моторного масла.

Однако следует отметить, что описанный выше метод углубленного анализа является дорогостоящим, его можно реализовать лишь в хорошо оснащенной лаборатории.

Задачей при выборе и разработке средств контроля состояния моторных масел является повышение чувствительности и точности контроля износа деталей основных узлов, механизмов и систем АТД, изготовленных как из ферромагнитных, так и цветных металлов; своевременное получение информации о возникновении износных отказов и предупреждение аварийных ситуаций, осуществление контроля интенсивности развития неисправностей и достижение максимально полного использования ресурса работы АТД, увеличение межремонтных сроков,

уменьшение расхода запасных частей при обоснованных сроках замены масла в системе смазки двигателя.

Совокупность указанных существенных признаков позволит обеспечить работу АТД при различных нагрузочных режимах и условиях окружающей среды, повысить чувствительность и точность контроля износа деталей основных узлов, механизмов и систем двигателя, изготовленных как из ферромагнитных, так и цветных металлов; своевременно получать информацию о возникновении износных отказов и предупреждать аварийные ситуации, осуществлять контроль интенсивности развития неисправностей и обеспечить достижение максимально полного использования ресурса работы АТД при обоснованных сроках замены масла в системе его смазки.

Список использованных источников

1. Дунаев, А. В. Исследование диагностических параметров, разработка методов и средств их контроля для совершенствования диагностирования и технического обслуживания МТП АПК / А. В. Дунаев, А. С. Соловьев – М. : ГОСНИТИ, 2014. – 359 с.
2. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В. П. Милуш [и др.] ; Минсельхозпрод Респ. Беларусь, УО «БГАТУ». – Мн. : БГАТУ, 2019. – 392 с.
3. Нечаев, Е. П. Безразборный контроль интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы дизелей / Е. П. Нечаев // Вестник МГТУ. – 2013. – № 4. – Т. 16. – С. 771–776.
4. Венцель, С. В. Спонтанные процессы, протекающие на смазанных поверхностях трения / С. В. Венцель, Е. А. Миронов // Трение и износ. – 1982. – № 1. – Т. 3. – С. 100–107.
5. Перч, В. Д. Мгновенная сила трения поршневого уплотнительного кольца / В. Д. Перч, Р. М. Петриченко, А. В. Шабанов // Двигателестроение. – 1984. – № 3. – С. 7–9.
6. Григорьев, М. А. Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. – М. : Издательство стандартов, 1977. – 324 с.
7. Афинецкий, С. А. Особенности конструкций поршневых колец современных автомобильных двигателей. Обзорная информация / С. А. Афинецкий, Ю. А. Коган, М. Н. Сильницкая // Автомобильные двигатели. – М. : НИИТавтопром, 1984. – 32 с.
8. Матвеевский, Б. Р. Метод контроля износа узлов трения / Б. Р. Матвеевский, В. Р. Матвеевский // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 1. – С. 14–16.
9. Патент РФ МПК (2006.01) G01N 3/56. Устройство для контроля износа пар трения : № 77 438 U1 : заявлено 30.04.2008 : опубл. 20.10.2008 / Матвеевский Б. Р., Матвеевский В. Р.
10. Патент РФ, МПК (2006.01) G01N 27/72. Способ анализа ферромагнитных частиц в масле : № RU2390012C1 : заявлено 16.03.2009 : опубл. 20.05.2010 / Сергеев С. М., Лозовой Л. Н.
11. Патент РФ МПК G01B7/14 F16N29/04. Способ обнаружения с повышенной чувствительностью, определения вида и оценки размера частиц металла в процессе изнашивания подшипников в проточных системах смазки силовых установок : RU2814854C1 : заявлено 03.03.2023 : опубл. 03.05.2024 / Белопухов В. Н. и др. ; заявитель ФГБУН Самарский Федеральный Исследовательский Центр РАН.
12. Патент США № US6111492. Magnetic drain plug (Магнитная сливная пробка) / Fink R.
13. How to Analyze Contaminants on Magnetic Drain and Fill Plugs/ Meritor, Inc. – URL: <https://graphicvillage.org/meritor/TP0838.pdf> (date of access: 16.09.2025).
14. Патент США № US5782141A. Engine having a non-intrusive self-closing valve for magnetic chip detectors (Двигатель с неинвазивным самозапирающимся клапаном для датчиков магнитной стружки) / R. J. Schoolcraft.
15. Патент США № US3800914A. Magnetic filter for lubricants (Магнитный фильтр для смазочных материалов) / S. Miyata.
16. Патент США № US4598280A. Electric chip detector (Электрический чип-детектор) / M. P. Bradford.
17. Патент США № US3432750A. Chip detector for magnetic and non-magnetic conductive particles (Детектор стружки ферромагнитных и неферромагнитных проводящих частиц) / D. W. Botstiber.
18. Патент СССР МПК: F16N 29/04. Сигнализатор наличия магнитной стружки в масле : № SU1247617A1 : заявлено 11.02.1985 : опубл. 30.07.1986 / Блувштейн Е. С. и др. ; заявитель Воронежский политехнический институт.
19. Патент США № US4731578A. Electrical sensing system for measuring ferrous particles within a fluid (Электрическая сенсорная система для измерения ферромагнитных частиц в технической жидкости) / E. Tsaprazis.
20. Патент СССР G 01 N 27/74. Вихретоковое устройство для измерения размеров и концентрации металлических частиц в жидкости : № SU1522085A1 : заявлено 23.09.1987 : опубл. 15.11.1989 / Быховский Ю. С. и др. ; заявитель Куйбышевский авиационный институт имени С. П. Королева.
21. Патент США № US5118410A. Debris collecting and measuring device with induction coil screen (Устройство для сбора и анализа частиц с индукционной экранирующей катушкой) / W. E. Rumberger.
22. Poseidon Systems. Trident DM4500/ Wear Debris Monitor. – URL: <https://servintel.com/wp-content/uploads/2023/12/Poseidon-Systems-Trident-DM4500.pdf> (date of access: 23.09.2025).
23. Metallic Wear Debris Sensor. Real time indication of condition / Parker Kittiwake. – URL: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Filter-Division-Europe/Websphere-Literature/MAK19755PA_MWDS_ISS3.pdf (date of access: 23.09.2025).

24. Metallic Wear Debris Sensor. Software Protocol Manual / Parker Kittiwake. – URL: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Filter-Division-Europe/WebSphere-Literature/MWDS-Manual-MA-K19555-KW.pdf> (date of access: 23.09.2025).
25. Metalscan MS4000 Online Oil Debris Monitoring System / Gastops. – URL: <https://www.gastops.com/wp-content/uploads/MS4000-Product-Overview.pdf> (date of access: 23.09.2025).
26. MetalSCAN MS4000. On-Line Oil Debris Monitor / Gastops. – URL: <https://vbr-turbinepartners.com/wp-content/uploads/2017/12/MS4000-Specification-Sheet.pdf> (date of access: 23.09.2025).
27. OPCom FerroS. Continuous Oil Condition Monitoring /ARGO-HYTOS. – URL: https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Datasheet_OPCom_FerroS_10055_EN_US.pdf (date of access: 24.09.2025).
28. OPCom FerroS. SPCO 500-1000 / ARGO-HYTOS. – URL: https://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Manual_OPCom_Ferros_V1.05.16_EN.pdf (date of access: 24.09.2025).
29. Патент РФ МПК G01N 27/00, G01N 38/28, G01N 33/30, F01N 11/10. Способ оперативного контроля качества трансмиссионного масла: № RU2758746 : заявлено 11.03.2021 : опубл. 01.11.2021 / Филатов И. С. и др. ; заявитель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».
30. Dobrinski, H. Micro-sensors for automotive liquid properties monitoring (D5.4) / Heiko Dobrinski, Torsten Eggers, Jörg Stürmann [and others] // SENSOR + TEST Conferences. – 2011, SENSOR Proceedings. – pp. 612–617.
31. Масла моторные для автотракторных дизелей. Технические условия : ГОСТ 8581–2021. – Взамен ГОСТ 8581-78 ; введ. 2022.07.01 – М. : Российский институт стандартизации, 2022.