

## ТРИБОТЕХНИКА

УДК 629.3.083.4:621.3.027.3

Ю.А. Власов, Н.Т. Тищенко

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ РАБОТАЮЩИХ МАСЕЛ

Смазочное масло, в процессе работы двигателя машины или силового агрегата с замкнутой системой смазки, изменяет свои физико-химические свойства. Как правило, эти свойства ухудшают эксплуатационные характеристики масла, причем нередки случаи, когда один или несколько показателей качества масла достигают предельных значений задолго до его регламентной замены.

Длительная работа агрегата на масле, потратившем запас качества, может привести к преждевременному выходу из строя узлов и механизмов этого агрегата. Для предупреждения последствий и выявления причин, снижающих эксплуатационную надежность агрегатов машин, необходимо проводить контроль качества работающих масел.

Для решения проблем оперативного контроля качества работающего масла, следует выявить такие общие свойства масла, которые были бы едиными для всей смазочной среды, и универсальными с точки зрения их обнаружения и приборной регистрации.

Свежее масло является диэлектриком и хорошим изолятором электрического тока, но в процессе работы, оно претерпевает изменения, связанные с изменениями внутренней среды самого масла и изменениями внешней эксплуатационной среды, в которой масло работает.

Изменения внутренней среды связаны с окислением масла, выработкой пакета присадок, увеличением вязкости и др.

Изменения свойств масла от изменений внешней среды связано с техническими нарушениями в работе агрегатов машин и неисправностями узлов и механизмов, что приводит к поступлению в работающее масло продуктов износа, пыли, топлива, воды и т.п.

Любое внутреннее изменение и вновь приобретенное состояние масла будет приводить к изменению физических свойств масла, что отразится на отклонении диэлектрической проницаемости и электропроводности масла.

Известен ряд электрофизических методов оценки состава работающего масла [1], которые включают электрооптический способ, атомно-абсорбционную спектрометрию, атомно-флуоресцентную спектрофотометрию, эмиссион-

ную спектрофотометрию.

Электрооптический способ основан на явлении релаксации оптической анизотропии после снятия ориентирующих дисперсию электрических полей. Пробу масла помещают между плоскими электродами, создают электрическое поле и через масло пропускают монохроматическое поляризованные оптическое излучение. По зарегистрированной интенсивности светового потока решением интегрального уравнения определяют функцию распределения частиц загрязнений по размерам. Достоинством способа является его чувствительность, и возможность определять концентрацию частиц и фракционный состав.

К недостаткам способа можно отнести невозможность выполнять экспресс анализ проб масла и его применение возможно только в лабораторных условиях.

Атомно-абсорбционная спектрометрия относится к методу спектрального анализа масла. Исследуемую пробу масла испаряют в плазме, затем измеряют интенсивность света от источника дискретного излучения, проходящего через пары пробы масла. По степени ослабления интенсивностей линий спектра, судят о концентрации элементов в пробе.

Метод предназначен для оценки противоизносных свойств моторных масел, а также технического состояния двигателей. Метод не является экспрессным и эффективен для определения концентрации только мелких частиц изнашивания деталей и не реагирует на крупные частицы размером выше 10 мкм.

Атомно-флуоресцентная спектрофотометрия близка принципом определения частиц износа в работающем масле к атомно-абсорбционной спектрометрии, не имеет ограничения по размеру частиц, но приемлема для определения только тех продуктов износа, металлы которых обладают резонансным излучением. Метод не является экспрессным.

Выше перечисленные методы обладают невысокой экспрессностью, а ввиду их сложности и низкой производительности они не нашли широкого применения при диагностировании агрегатов машин по параметрам работающего масла.

Для оценки свойств работающих масел с це-

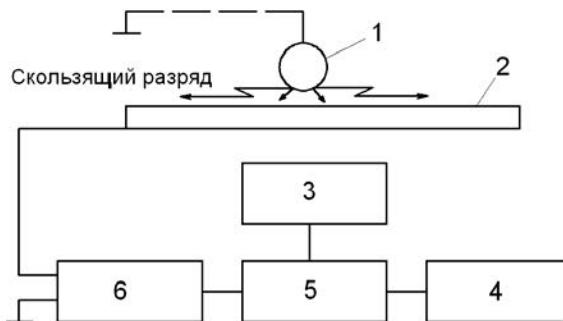


Рис. 1. Схема устройства для фотометрирования газового разряда

лью диагностирования агрегатов машин известен метод эмиссионной спектрометрии [2]. Согласно методу пробу работающего масла помещают в область электрического разряда, проводят аппаратную регистрацию свечения разряда и выполняют алгоритмическую обработку зарегистрированной информации, которая подвергается сравнительному анализу интенсивностей спектральных линий, соответствующих различным химическим элементам и характеризующим степень износа и загрязнения.

Этот метод имеет также недостатки. Специальная подготовка проб работающего масла обуславливает его низкую производительность, что ограничивает возможность текущего контроля при наличии большого парка машин. Кроме того, недостатками данного метода являются высокая генерация озона, ультрафиолетового излучения и выбросы продуктов сгорания проб и электродов.

Работа спектральной установки основана на принципе газоразрядной диагностики, по которому конденсированная искра (или дуга) испаряет газы, которые содержат компоненты смазочной среды, а возбуждаемый спектр этих компонентов фотографируется по длинам волн их аналитических линий. Исходя из этого, мы предполагаем, что высоковольтное свечение позволяет определять загрязняющие компоненты смазочной среды путем фотофиксации. Но для этого следует оптимизировать поиск технического решения согласно представленной схемы действий: смазочная среда → разряд → компонент загрязнения.

Для реализации такой схемы и в соответствии с работами [3–5], была выдвинута гипотеза, что если к смазочной среде приложить высоковольтное напряжение, то возникнет свечение за счет ионизации газов, компоненты которого будут содержать информацию о состоянии смазочной среды. Следовательно, необходимы такие технические средства, которые позволили бы ионизировать смазочную среду и зарегистрировать изображение свечения для дальнейшего его декодирования.

Поиск новых технических решений позволил обратить внимание на то, что в 1949 году был предложен метод фотографирования с помощью

токов высокой частоты [6]. По своей сути это фотографирование газоразрядного свечения, которое получило название «Кирлианографика». В настоящее время метод газоразрядной фотографии находит применение в некоторых сферах деятельности человека. В большей степени это касается медицины, криминалистики и дефектоскопии материалов органического и неорганического происхождения [7].

Практика газоразрядного свечения реализуется посредством высокочастотных трансформаторов высокого напряжения. Регистрация изображения газоразрядного свечения базируется на устройстве (рис. 1), которое обеспечивает газовый разряд в диэлектрическом зазоре, основным элементом которого является исследуемый объект. Между исследуемым объектом 1 и диэлектрической пластиной 2, на которой размещается объект, подаются высокочастотные импульсы (от 1 кГц до 100 МГц) высокого напряжения (от 1 до 100 кВ) от трансформатора 6. На обратную сторону диэлектрической пластины 2 наносится токопроводящее покрытие. Если к такому покрытию приложить высокое напряжение, то между исследуемым объектом 1 и пластиной 2 будет развиваться скользящий газовый разряд. Свечение разряда с помощью оптической системы 3 преобразуется в видеосигналы, которые записываются в виде одиночных кадров в блок памяти 5, связанный с компьютерным процессором 4. Процессор представляет собой специализированный программный комплекс, который позволяет алгоритмически обрабатывать результаты газоразрядной визуализации.

В настоящей работе исследуемыми объектами газоразрядной визуализации являются пробы работающего и свежего масла, как носители информации о состоянии смазочной среды.

Согласно схеме (рис. 1), капельные пробы работающих и свежих масел идентичной марки нааются на бумажные фильтроэлементы и одновременно помещаются в газоразрядное устройство. Высокое напряжение индуцирует неоднородное электрическое поле, которое наводит светящуюся корону тлеющего разряда скользящую по поверхности фильтроэлементов с пробами масел.

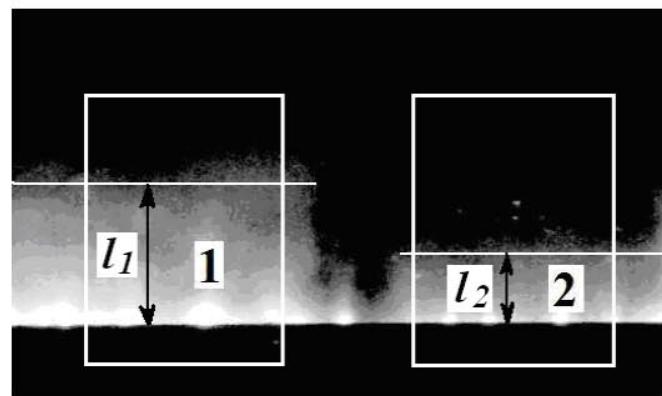


Рис. 2. Фотография короны тлеющего разряда двух проб смазочного масла: 1 – эталонного; 2 – работающего

Одной из численных мер газоразрядного свечения является расстояние  $l$  от кромки электрода до дискретных границ яркости визуального изображения свечения короны (рис. 2).

Устройство алгоритмически обрабатывает две равные площади спроектированного свечения от источника разряда на фотодетектор при фотометрировании. При этом атмосферное давление, температура воздуха и импульсное напряжение являются величинами постоянными. Такая одновременная регистрация свечений двух проб масла исключает грубые и случайные ошибки измерений.

При фотометрировании тлеющего разряда фотодетектор облучается потоком фотонов, который пропорционален интенсивности свечения и зависит от условий протекания разряда:

$$I_i = \frac{\varepsilon_0 c \sqrt{\varepsilon_1} \mu U^2}{2l_i^2};$$

$$l_i = \sqrt{\frac{d}{\rho \omega \varepsilon_M \left[ 1 + \frac{C_V}{\frac{1-C_V}{3} + \frac{C_V}{\varepsilon_3 - \varepsilon_M}} \right]}},$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость газа (воздуха);  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $U$  – напряжение от высоковольтного трансформатора;  $d$  – толщина изолятора, на котором размещаются пробы масел;  $\omega$  – угловая частота подводимого тока;  $\rho$  – поверхностное сопротивление изолятора;  $C_V$  – объемная концентрация загрязняющих примесей волях единицы;  $\varepsilon_3$  – диэлектрическая проницаемость загрязняющей примеси;  $\varepsilon_M$  – диэлектрическая проницаемость чистого смазочного масла,  $l_i$  – длина короны тлеющего разряда  $i$ -ой пробы масла.

Поглощаемый фотодетектором от электрического разряда свет преобразует его в электрический ток. В зависимости от излучаемой длины волны света, за счет явления внутреннего фотоэффекта, электроны накапливаются в отдельных ячейках пикселях. Чем интенсивнее световой поток, тем выше итоговый разряд данного пикселя [8]. Таким образом, свет от разряда, после того как он попадет на фотоприемник, через отдельные пиксели матрицы, создает цветовые составляющие спектра в градациях яркости, которые в дальнейшем используются при алгоритмической обработке результатов.

Для того чтобы количественно оценить степень загрязненности работающего масла, принимается коэффициент условного показателя интенсивности свечения:

$$K_{IC} = \frac{I_p}{I_3}.$$

Этот коэффициент показывает во сколько раз интенсивность свечения скользящего разряда пробы с работающим маслом, отличается от интенсивности свечения со свежим (эталонным) маслом. Таким образом, коэффициент  $K_{IC}$  характеризует степень загрязненности работающего масла, которая выражается через концентрации загрязняющих примесей.

Работающее масло можно представить как бинарную смесь – чистое масло плюс загрязнитель. Оценить качественные свойства масла можно, моделируя степень его загрязненности различной концентрацией воды, моторного топлива, кремния и металла. Каждый из этих загрязняющих компонентов является показателем диагностического признака, который представляет интерес, как при оценке качественных свойств работающего масла, так и при оценке технического состояния агрегата машины. Из данной группы загрязняющих компонентов можно выделить компоненты, снижающие распространение тлеющего разряда по поверхности работающего масла относительно свежего и повышающие величину газового разряда.

К компонентам, снижающим интенсивность свечения, относят такие загрязнители, как вода и кремний, т.к. их диэлектрическая проницаемость выше диэлектрической проницаемости свежего масла.

Повышению интенсивности свечения будут способствовать моторное топливо и металлические продукты износа. Моторные топлива (бензин, дизельное топливо) имеют значения диэлектрической проницаемости ниже эталонного значения данного показателя для чистого масла.

Металлические продукты износа не обладают диэлектрическими свойствами. На изменение интенсивности свечения будет оказывать влияние поверхностная проводимость, как обратная величина поверхностного сопротивления изолятора, на котором и находятся продукты износа в масле.

Если коэффициент интенсивности свечения выше единицы, то он способен характеризовать технические состояния машин, связанные с неисправностями топливной аппаратуры двигателя или системы очистки масла.

Значения  $K_{IC}$ , меньшие единицы, свидетельствуют об обводненности масла за счет неисправностей системы охлаждения двигателя, о нарушении системы очистки воздуха или негерметичности соединений агрегатов машин.

В случае отсутствия неисправностей, снижение интенсивности свечения может свидетельствовать о выработке пакета присадок в масле и

процессах его естественного окисления.

**Вывод.** Анализ ряда известных электрофизических методов оценки свойств работающих масел показал их невысокую производительность, что не позволяет их в должной степени использовать при проведении диагностических работ с большой производственной программой по обслуживанию машин.

Выявленные свойства масла в виде изменений диэлектрической проницаемости масляной среды в процессе его работы, во многом способствуют развитию нового метода оценки свойств масла через регистрацию интенсивности свечения исследуемых проб масла в среде газового разряда.

Фотометрирование тлеющего разряда и алгоритмическая обработка его интенсивности свечения занимает несколько секунд, что с подготовкой пробы масла к анализу не превышает пяти минут. Это позволит использовать данный метод оценки свойств работающего масла, как метод экспресс-диагностики.

Выявленные закономерности изменения интенсивности свечения в зависимости от различных концентраций продуктов износа, воды, моторного топлива и абразивной пыли в масле, позволяют применять данный метод для предварительного входного контроля проб работающего масла, с последующим применением комплекса стандартных методов в случае превышения браковочного значения по предлагаемому методу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мышкин, Н.К. Диагностика изнашивания смазанных подвижных сопряжений / Н.К. Мышкин, О.В. Холодилов, Л.В. Маркова, М.С. Семенюк // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. - № 6. – С. 1091–1101*
2. *Соколов, А.И. Применение эмиссионного спектрального анализа масла для оценки износа и свойств работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко. – Томск: Изд-во ТГУ, 1979. – 209 с.*
3. *Сканави, Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1958. – 896 с.*
4. *Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.*
5. *Александров, Г.Н. Техника высоких напряжений / Г.Н. Александров [и др.] / Под ред. М.В. Костенко. – М.: Вышш. школа, 1973. – 528 с.*
6. *Кирлиан, В.Х. В мире чудесных разрядов / В.Х. Кирлиан, С.Д. Кирлиан. – М.: Знание, 1964. – 40 с.*
7. *Шустов, М.А. Электроразрядная фотография / М.А. Шустов, Е.Т. Протасевич. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1999. – 244 с.*
8. *Приборы с зарядовой связью / В.Д. Бейкер / Под ред. Д.Ф. Барба. – М.: Мир, 1982. – 240 с.*

### □ Авторы статьи

Власов

Юрий Алексеевич,  
канд.техн.наук, доцент, докто-  
рант каф. «Автомобили и трак-  
торы» Томского государствен-  
ного архитектурно-строительного  
университета,  
Email: [yury2006@yandex.ru](mailto:yury2006@yandex.ru)  
сот. 8-913-803-73-81,

Тищенко

Николай Терентьевич,  
канд.техн.наук, профессор, зам.  
зав. каф. «Автомобили и тракто-  
ры» Томского государственного  
архитектурно-строительного  
университета,  
тел. (3822) 65-31-16