

## ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА МОТОРНЫХ МАСЕЛ

О.Б. Боднар, И.В. Анищенко  
РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва,  
e-mail: [bodnar.oleg@bk.ru](mailto:bodnar.oleg@bk.ru)

Моторное масло – дисперсная система, состоящая из базового масла и присадок, модифицирующих вязкость и выполняющих моюще-диспергирующие, антиокислительные, противоизносные и антикоррозионные функции. Для нейтрализации кислотных продуктов сгорания топлива и окисления углеводородных молекул, удержания загрязняющих частиц в суспензии и предотвращения их агломерации в моторные масла добавляют щелочные присадки. Щелочные присадки состоят из полярных молекул, базовые масла и небольшая часть присадок – из неполярных. Таким образом, моторные масла представляют собой смесь неполярных и полярных диэлектриков. Содержание полярных диэлектриков (щелочных компонентов) в смеси показывает один из базовых эксплуатационных параметров – щелочное число.

Зависимость коэффициента вязкости (кинематической или динамической) от температуры – одна из важнейших характеристик моторного масла. Эта зависимость определяет рабочий диапазон температур, надежное смазывание и охлаждение деталей двигателя при максимальных нагрузках. Вязкость обусловлена наличием сил внутреннего трения, возникающих в результате межмолекулярных взаимодействий молекул жидкости.

### Теоретические основы метода экспресс-анализа моторных масел

*Диэлькометрия* – совокупность электрофизических методов исследования состава и свойств веществ, основанных на измерении диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  на низких частотах экспериментально определяется как отношение емкости с исследуемым диэлектриком  $C$  к емкости без диэлектрика  $C_0$  (воздушного конденсатора):

$$\varepsilon = C / C_0. \quad (1)$$

При внесении жидкого диэлектрика в переменное электрическое поле конденсатора  $E = E_0 e^{i\omega t}$  результирующая плотность тока  $j(t)$  складывается из плотностей токов, обусловленных механизмом упругой поляризации электронных оболочек  $j_1(t)$  и механизмом тепловой поляризации полярных молекул  $j_2(t)$  [1]:

$$j(t) = j_1(t) + j_2(t). \quad (2)$$

Плотность тока  $j_1(t)$ , связанная с механизмом упругой поляризации электронных оболочек, вследствие малой инерционности в области низких частот имеет только реактивную составляющую (ток смещения):

$$j_1(t) = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = i\omega \varepsilon \varepsilon_0 E_0 e^{i\omega t}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Для расчета второй составляющей плотности тока  $j_2(t)$  исследуем динамику изменения поляризованности  $P$  при тепловой поляризации. Поляризованность  $P$  равна поверхностной плотности связанных зарядов. Тепловая поляризация возникает за счет постепенного изменения электрического момента в объеме диэлектрика путем асимметричного распределения диполей в процессе установления термодинамического равновесия. Скорость уменьшения поляризованности пропорциональна самой величине поляризованности:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{1}{\tau} P, \quad (4)$$

где  $\tau$  – время релаксации, в течение которого поляризованность уменьшается в  $e$  раз. Время релаксации, как и вязкость, определяется силами межмолекулярного взаимодействия и температурой.

Если к диэлектрику приложить переменное напряжение, то изменение поляризованности описывается уравнением:

$$\frac{dP}{dt} + \frac{1}{\tau} P = \frac{n_S \alpha}{\tau} E_0 e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где  $n_S$  – концентрация полярных молекул на обкладках конденсатора,  $\alpha$  – поляризуемость диполей. Поляризуемость дипольной поляризации, обусловленной тепловым движением:

$$\alpha = \frac{p_0^2}{3kT}, \quad (6)$$

где  $p_0$  – дипольный момент молекулы при отсутствии поля,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – термодинамическая температура.

Стационарное решение уравнения (5) имеет вид:

$$P(t) = \frac{n_s \alpha}{1 + i\omega\tau} E_0 e^{i\omega t}. \quad (7)$$

Плотность тока  $j_2(t)$

$$j_2(t) = \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{in_s \alpha \omega}{1 + i\omega\tau} E_0 e^{i\omega t} = \frac{i - \omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} n_s \alpha \omega E_0 e^{i\omega t} \quad (8)$$

включает активную

$$j_{2a}(t) = \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} n_s \alpha \omega E_0 e^{i\omega t} \quad (9)$$

и реактивную составляющие:

$$j_{2r}(t) = \frac{i}{1 + \omega^2 \tau^2} n_s \alpha \omega E_0 e^{i\omega t}. \quad (10)$$

Векторная диаграмма плотностей токов и напряженности поля дисперсной системы, состоящей из полярных и неполярных диэлектриков, представлена на рис. 1. Угол  $\delta$  – угол между активной и реактивной составляющими плотности тока  $j$ . Дипольные моменты  $p_0$  полярных молекул, входящих в состав дисперсантов и детергентов, составляющих основу щелочных присадок, имеют величины порядка  $10^{-30}$  Кл·м, среднее значение объемной концентрации полярных молекул  $n$  порядка  $10^{26}$  м<sup>-3</sup>. Подстановка этих значений в выражения (6) и (10) позволяет сделать вывод о том, что в рабочем диапазоне температур реактивная составляющая плотности тока смещения  $j_1(t)$  (3) на два порядка больше реактивной составляющей механизма тепловой поляризации  $j_{2r}(t)$  (10) и при расчете  $\text{tg} \delta$  реактивной составляющей  $j_{2r}(t)$  можно пренебречь.

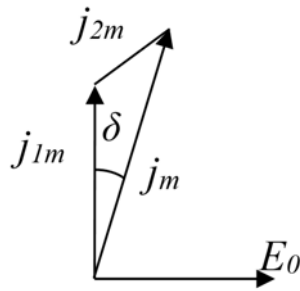


Рис. 1. Векторная диаграмма плотностей токов и напряженности поля системы, состоящей из полярных и неполярных диэлектриков:  $j_{1m}$  – амплитуда плотности тока смещения;  $j_{2m}$  – амплитуда плотности тока механизма тепловой поляризации;  $E_0$  – амплитуда напряженности поля конденсатора;  $\delta$  – угол потерь

Тангенс угла потерь численно равен отношению плотности тока активной составляющей к плотности тока реактивной составляющей в переменном синусоидальном электрическом поле. Для исследуемой системы абсолютное значение  $\text{tg} \delta$  определяется так:

$$\text{tg} \delta = \frac{j_{2a}(t)}{j_1(t)} = \frac{n_s \alpha}{\epsilon \epsilon_0} \frac{\omega \tau}{(1 + (\omega \tau)^2)} = \frac{a}{\epsilon} \frac{\omega \tau}{(1 + (\omega \tau)^2)}, \quad (11)$$

где

$$a = \frac{n_s \alpha}{\epsilon_0} = \frac{n_s}{\epsilon_0} \frac{p_0^2}{3kT} - \quad (12)$$

безразмерный параметр, зависящий от концентрации полярных присадок. В моторном масле присутствуют полярные присадки с разными дипольными моментами  $p_{0i}$  и концентрациями  $n_{Si}$ , поэтому:

$$a = \frac{\sum_i n_{Si} p_{0i}^2}{3\epsilon_0 kT}, \quad (13)$$

где  $i$  – число полярных компонентов системы. Параметр  $a$  является интегральным параметром многокомпонентной системы и может служить критерием оценки концентрации полярных присадок (щелочного числа). Данный параметр зависит также и от дипольных моментов присадок  $p_{0i}$ , поэтому для контроля концентрации щелочных присадок необходимы данные о химическом составе моторного масла.

Время релаксации  $\tau$  тепловой поляризации в новом масле определяется межмолекулярным взаимодействием присадок с базовым маслом и может служить критерием оценки вязкости. С увеличением срока эксплуатации масел уменьшается концентрация антиоксидантов, что приводит к накоплению продуктов окисления и повышению вязкости. Повышению вязкости также способствует увеличение в процессе работы числа макрочастиц, находящихся во взвешенном состоянии. Эти факторы способствуют снижению подвижности диполей в моторном масле и увеличению времени релаксации.

Таким образом, полученные частотные характеристики тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости позволяют определить параметры  $a$  и  $\tau$  (10), непосредственно связанные с вязкостью и щелочным числом, и отслеживать динамику их изменения в процессе эксплуатации.

### **Описание измерительного прибора**

Многоканальный измеритель диэлектрических свойств моторных масел (прибор ИДС-201) [2] представляет собой измерительный блок, состоящий из набора воздушных конденсаторов и датчика температуры и соединенный с персональным компьютером через последовательный порт. ПК служит для обработки и визуализации результатов измерений частоты, относительной диэлектрической проницаемости, температуры, ёмкости и тангенса угла потерь. Диэлькометрические преобразователи создают электрическое поле в исследуемом веществе. Конфигурация и напряжённость поля определяются топологией обкладок датчиков и рабочим напряжением. Для снижения уровня помех преобразователь заключён в экранированный корпус, внутри которого располагаются датчики температуры. Этими устройствами управляет цифровой сигнальный процессор, он же обменивается информацией с платой блока отображения информации. Технические характеристики прибора приведены в табл. 1.

## Технические характеристики прибора ИДС-201

Погрешность измерения диэлектрической проницаемости, %, не более	0.2
Погрешность измерения удельной электрической проводимости, %, не более	1
Погрешность измерения тангенса угла потерь, %, не более	1
Быстродействие, изм/с, не менее	10
Объём пробы, мл	800
Индикация результатов работы, ЖКИ разрешение, не менее	320x240
Подключение к ПЭВМ (опция)	USB
Диапазон рабочей частоты	1 – 1000 кГц

## Результаты и их обсуждение

Исследования дисперсионных зависимостей тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости проводились для минеральных, синтетических и полусинтетических масел на приборе ИДС-201 с воздушным конденсатором емкостью 900 пФ. Экспериментальные данные для синтетического масла HONDA OW20 для диапазона температур от 20 до 90 °С и масла на минеральной основе M8V для температуры 25 °С представлены на рис. 2–4.

Как видно из данных эксперимента, тангенс угла потерь новых масел превышает аналогичный параметр масел с пробегом. С ростом температуры значение тангенса для фиксированной частоты возрастает. Аналогичные закономерности наблюдались для всех исследованных масел [2].

В процессе эксплуатации масел концентрация присадок  $n_S$  уменьшается, что приводит к снижению тангенса угла потерь для масел с пробегом (12). Повышение температуры способствует адсорбции присадок на поверхность обкладок конденсатора, возрастанию концентрации  $n_S$  и увеличению тангенса угла потерь в соответствии с (12).

Выражение (11) при  $(\omega\tau)^2 \gg 1$  приводится к виду:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{a}{\varepsilon \omega \tau}. \quad (14)$$

Время релаксации можно определить по дисперсионным зависимостям тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости. Для заданной температуры и двух частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  отношение тангенсов  $\operatorname{tg} \delta_1$  и  $\operatorname{tg} \delta_2$  может быть приведено к виду:

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\operatorname{tg} \delta_2} = \frac{\varepsilon_2(1 + (\omega_2 \tau)^2) \omega_1}{\varepsilon_1(1 + (\omega_1 \tau)^2) \omega_2}, \quad \text{откуда} \quad \tau = \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \delta_1 \varepsilon_1 \omega_2 - \operatorname{tg} \delta_2 \varepsilon_2 \omega_1}{\operatorname{tg} \delta_2 \varepsilon_2 \omega_1 \omega_2^2 - \operatorname{tg} \delta_1 \varepsilon_1 \omega_2 \omega_1^2}}, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Время релаксации для температуры 300 К, рассчитанное из (15), для синтетических масел без пробега составляет  $0.4 \cdot 10^{-3}$  с, для минеральных масел –  $0.7 \cdot 10^{-3}$  с. С увеличением пробега время релаксации возрастает и увеличивается приблизительно на 10% для масел, подлежащих замене.

Частотные зависимости тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости при известном времени релаксации  $\tau$  (14) позволяют рассчитать отношение параметров  $a_1$  для масла с пробегом к аналогичному параметру нового масла  $a_2$  для фиксированной частоты и температуры:

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \varepsilon_2 \tau_2}{\operatorname{tg} \delta_1 \varepsilon_1 \tau_1}. \quad (16)$$

Это отношение пропорционально отношению концентраций полярных присадок (12) и позволяет оценить степень выработки ресурса моторного масла.

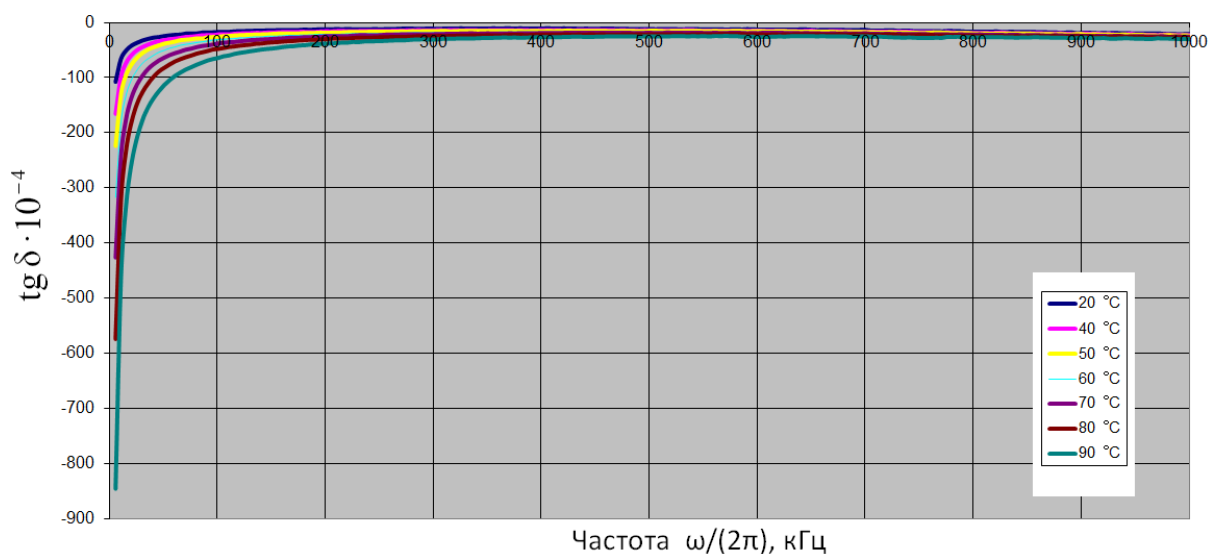


Рис. 2. Частотные зависимости тангенса угла потерь для нового моторного масла HONDA OW20 без пробега

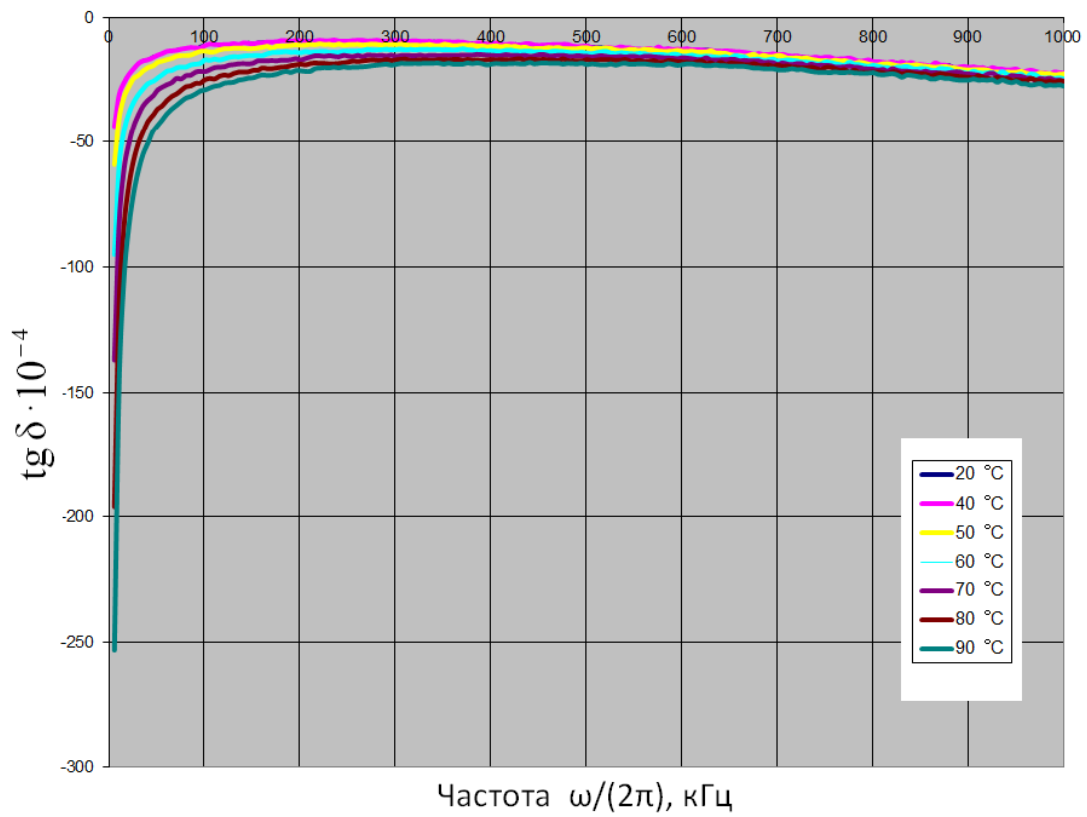


Рис. 3. Частотные зависимости тангенса угла потерь для нового моторного масла HONDA OW20 с пробегом 8000 км

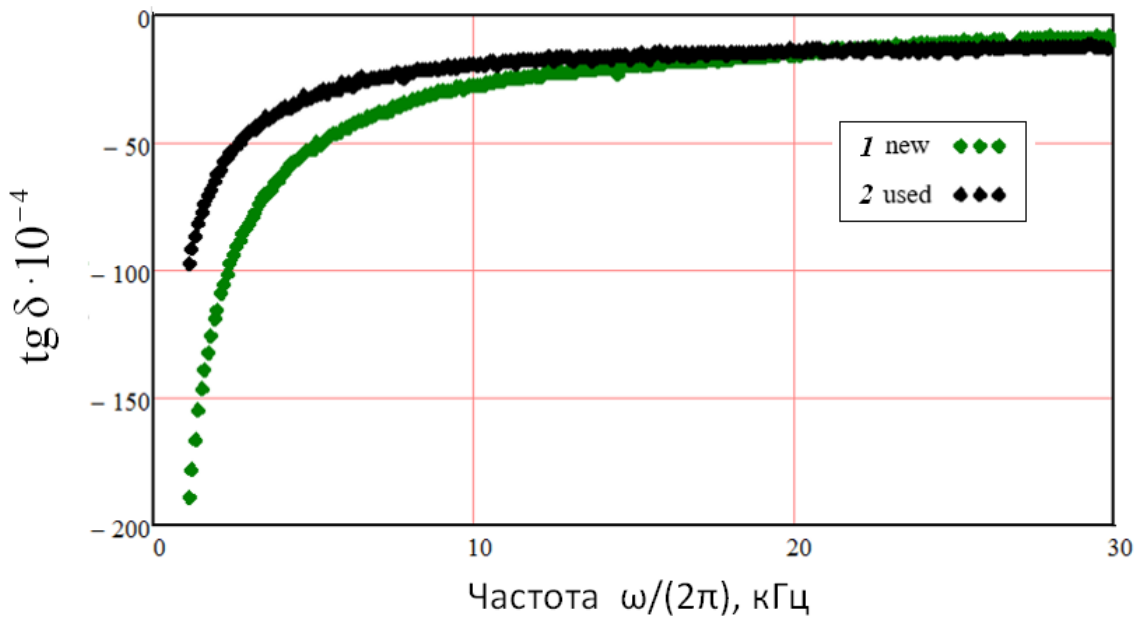


Рис. 4. Зависимость тангенса угла потерь от частоты для моторного масла M8V при  $T=300$  К: 1 – новое масло; 2 – масло с выработанным ресурсом



Разработанный метод дает возможность существенно сократить время измерений и обеспечить удаленный комплексный контроль. Измерительные устройства при технической реализации метода не требуют высоких затрат. К недостаткам метода следует отнести необходимость градуировки показаний для учета разницы химического состава масел и процессов адсорбции. Метод может применяться как для оценки качества новых масел, так и для определения необходимости их замены по эксплуатационным характеристикам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Поплавко Ю.М.* Физика диэлектриков. – Киев: Вища школа, 1980. – 398 с.
2. *Боднарь О.Б., Дидин Г.А, Аракелов П.Ю.* Измеритель диэлектрических свойств нефтепродуктов ИДС-201 // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, 8–10 февр. 2016. – М., 2016. – С. 15.
3. *Боднарь О.Б.* Диэлькометрия моторных масел // Там же. – С. 14.