

Поляризация и электропроводность некоторых моторных масел как дисперсных систем

И. В. Изместьев, О. А. Кожевникова

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: izmestiev@psu.ru

Исследованы поляризация, диэлектрические потери и электропроводность четырех синтетических моторных масел. Предполагалось, что все они представляют собой дисперсные системы, в которых в дисперсионную среду (базовое масло) как идеальный диэлектрик в виде дисперсных фаз внедрены присадки, часть из которых составляют ионогены. Все масла являются неполярными диэлектриками с экспоненциальным изменением удельной электрической проводимости от 17–130 нСм/м при 40 °С до 0.18–1.12 мкСм/м при 100 °С. Дисперсия диэлектрической проницаемости при частотах ниже 10 кГц обусловлена электродной поляризацией. Энергия активации электропроводности в температурном интервале 40–100 °С для всех масел находится в области 0.35–0.40 эВ и определяется не только вязкостью дисперсионной среды, но и энергией диссоциации присадок.

Ключевые слова: дисперсная система; моторное масло; поляризация; электропроводность

Поступила в редакцию 14.01.2016; принята к опубликованию 03.03.2016

Polarization and electrical conductivity of some engine oils as disperse systems

I. V. Izmestiev, O. A. Kozhevnikova

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
email: izmestiev@psu.ru

The main characteristics of engine oil are viscosity and an index of viscosity. Viscosity of oil η and its specific electric resistance is correlated with each other. Therefore their simultaneous research is of interest. Considering that fact that this communication is still insufficiently studied, and the electric equipment is constantly improved, the experimental study of four synthetic engine oil of the Castrol, Shell and Ravenol companies is undertaken. In the range of temperatures from 40 to 100 °C conductivity, polarization and dielectric losses were measured. It was supposed that all oils represent dispersion medium in which into dispersive environment (basic oil) as ideal dielectric in the form of disperse phases is introduced additives part from which are ionogenic. All oils are unpolar dielectrics with exponential increase in specific electric conductivity from 17–130 nS/m at 40 °C to 0.18–1.12 mS/m at 100 °C. Dispersion of dielectric permittivity with frequencies below 10 kHz is caused by electrode polarization. Energy of activation of specific electric conductivity γ in a temperature in-

terval for all oils is in area 0.35–0.40 eV and is defined not only viscosity of the dispersion medium, but also energy of dissociation of ionogenic additives.

Keywords: disperse system; engine oil; polarization ; electrical conductivity

Received 14.01.2016; accepted 03.03.2016

doi: 10.17072/1994-3598-2016-1-43-50

1. Введение

Ни один двигатель наземного, воздушного, морского транспорта не может работать без моторного масла, которое позволяет более эффективно использовать применяемое транспортное средство. Поэтому мировая промышленность выпускает в год несколько десятков миллионов тонн этого важного продукта. Однако физико-химические свойства масел до сих пор недостаточно изучены.

Для химической промышленности при организации производства моторного масла необходимо правильно решить вопросы выбора индекса вязкости базового масла, качества и количества применяемых к нему присадок. Многие вопросы, связанные с обеспечением качества масел, решаются эмпирически путем подбора. В то же самое время наука предлагает все более совершенную измерительную аппаратуру, которая позволит решить задачи совершенствования технологического процесса, например, правильно подобрать концентрацию поверхностно-активных присадок, способных обеспечить моющие и ингибиторные свойства. Исследование связи вязкости масла и его электропроводности облегчат выбор оптимальной величины индекса вязкости.

Такие, например, современные радиоизмерительные методы, как диэлектрометрия [1, 2] или ядерный магнитный резонанс [3], могут решать задачи, связанные с эксплуатацией масел:

1) правильно выбрать моторное масло для того или иного вида транспорта, что позволяет наиболее эффективно его использовать. При этом, очевидно, решаются не только технические, но и экономические задачи;

2) следить за изменением физических свойств масла в процессе его эксплуатации на транспорте и решать вопрос о своевременной его замене;

3) созданная с помощью радиоизмерений база данных позволит своевременно обнаружить фальсификат, который, как свидетельствуют различные источники информации, нередко встречается на современном рынке моторных масел.

Итак, в настоящей работе проведено исследование электрофизических свойств масел таких ведущих мировых компаний, как Shell, Castrol, Ravenol. Рассматривая чистое моторное масло как дисперсную систему типа Ж₁/Ж₂ [4], исследованы электропроводность и поляризация четырех образцов. Основное внимание уделено изучению ионной

проводимости и выявлению электродной поляризации при различных частотах и температурах. Исследование температурной зависимости удельной электрической проводимости позволило определить её энергию активации.

2. Электрофизические свойства моторных масел как дисперсных систем

2.1. Поляризация

Поляризация неполярных диэлектриков происходит вследствие смещения электронов, ядер атомов и молекул, а также ионов под действием приложенного напряжения. С поляризацией диэлектрика связана одна из важнейших характеристик – диэлектрическая проницаемость вещества ϵ , определяющая его способность участвовать в образовании электрической ёмкости. Жидкие диэлектрики обычно делят на две группы: неполярные ($\epsilon = 2 \div 3$) и полярные, когда $\epsilon > 3$ [5, 6], где ϵ – диэлектрическая проницаемость (относительная диэлектрическая проницаемость) среды.

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз электрическое поле в диэлектрике меньше электрического поля в вакууме, что дает возможность судить об интенсивности процессов поляризации и качестве диэлектрика. Температурная и частотная зависимости диэлектрической проницаемости содержат информацию о механизмах поляризации и их относительном вкладе в результирующую поляризацию среды.

В световом диапазоне длин волн ϵ невелика и близка к значению квадрата показателя преломления света n :

$$\epsilon = n^2. \quad (1)$$

В этом случае с ростом температуры ϵ обычно уменьшается, что связано с уменьшением плотности жидкости и, соответственно, уменьшением концентрации молекул.

Результаты анализа применяемых на практике моторных масел с учетом многочисленных присадок [7] позволяют сделать вывод о том, что чистое моторное масло представляет собой микрогетерогенную многофазную систему, в которой, по крайней мере, одна из фаз (например, детергент) находится в дисперсном состоянии. С учетом фильтрации масла в двигателе эксплуатационное

моторное масло также можно отнести к высокодисперсным или даже коллоидным системам (наносистемам) [4]. Дисперсионной средой является базовое минеральное или синтетическое масло, электрическое поле внутри которого, находящегося между пластинами плоского конденсатора:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_0 - \frac{P\mathbf{z}}{\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где \mathbf{z} – нормальный к поверхности электрода единичный вектор, \mathbf{E}_0 – поле, обусловленное внешними зарядами (внешнее поле), \mathbf{E}_1 – поле поверхностных зарядов на краях диэлектрика (деполяризующее поле), P – поляризованность диэлектрика (дипольный момент единицы объема), ε_0 – электрическая постоянная [8]. При известной плотности зарядов σ на краях диэлектрика и однородном деполяризующем поле

$$E_1 = -\frac{|\sigma|}{\varepsilon_0} = -\frac{P}{\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Знак минус отражает тот факт, что поле E_1 внутри диэлектрика направлено противоположно внешнему полю E_0 .

Однородное внешнее поле E_0 будет индуцировать в диэлектрике однородную поляризацию:

$$P = \varepsilon_0 \chi E, \quad (4)$$

где диэлектрическая восприимчивость $\chi = \varepsilon - 1$, а так как в рассматриваемом случае поле \mathbf{E}_0 однородно и направлено перпендикулярно плоским электродам, то

$$E = E_0 - \frac{NP}{\varepsilon_0}. \quad (5)$$

Для плоского конденсатора в системе СИ деполяризующий фактор $N = 1$ [8], а с учетом (4) и (5) имеем

$$P = \frac{\chi \varepsilon_0}{1 + \chi} E_0. \quad (6)$$

Диэлектрическая проницаемость изотропной среды определяется отношением

$$\varepsilon = 1 + \chi. \quad (7)$$

Для моторного масла как дисперсной системы, в которой присадки играют роль дисперсной фазы, а дисперсионной средой оказывается базовое масло, можно применить формулу Клаузиуса–Моссотти

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum_j N_j \alpha_j, \quad (8)$$

которая устанавливает связь между диэлектрической проницаемостью дисперсионной среды, поляризуемостью её атомов α_j и числом атомов с такой поляризуемостью в единице объема N_j . В области оптических частот диэлектрическая проницаемость почти полностью обусловлена электронной поляризуемостью α_j^{el} , тогда

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \sum_j N_j \alpha_j^{el}. \quad (9)$$

Диэлектрическая проницаемость зависит от изменяющихся внешних факторов – частоты приложенного к диэлектрику напряжения, температуры, давления, влажности и прочее. Время установления электронной или ионной (деформационной) поляризации весьма мало по сравнению со временем изменения знака напряжения (т. е. с полупериодом переменного напряжения) вплоть до области сверхвысоких частот. Поэтому в диэлектриках, для которых характерен лишь деформационный механизм релаксации, поляризация устанавливается практически мгновенно, и при постоянной температуре дисперсия диэлектрической проницаемости не наблюдается.

В случае дипольной поляризации полярных диэлектриков при повышении частоты переменного напряжения величина ε сначала также остается неизменной, но, начиная с некоторой частоты, когда поляризация уже не успевает полностью устанавливаться за один полупериод, ε начинает снижаться, приближаясь при высоких частотах к значениям, характерным для неполярных диэлектриков.

В неоднородных или гетерогенных диэлектриках, в частности в диэлектриках с включением воды, наблюдается явление миграционной поляризации. В некоторых работах миграционную поляризацию (interfacial polarization) в зависимости от ситуации называют также высоковольтной, межслойной или объемной поляризацией. Процессы установления миграционной поляризации сравнительно медленны и могут протекать на протяжении минут или даже часов [5].

Диэлектрическая проницаемость при повышении частоты может от неё не зависеть или уменьшаться, но не увеличиваться. Таков характер дисперсии этой величины.

Кроме перечисленных эффектов следует назвать электродную поляризацию, которая определяется разностью значений электродных потенциалов при равновесии и при пропускании через электрод внешнего электрического тока. Электродные процессы характеризуются переносом зарядов через границу между электродом и дисперсионной средой. Эти процессы всегда идут в двух направлениях и зависят от скоростей электродных

процессов (прежде всего, скоростей электрохимических реакций окисления на аноде и восстановления на катоде) [9].

2.2. Электропроводность и диэлектрические потери

Электропроводность жидких диэлектриков зависит от многих факторов: строения молекул, температуры, наличия примесей и наличия крупных заряженных коллоидных частиц. Электропроводность неполярных жидкостей может зависеть от присутствия в них диссоциированных примесей и влаги. В полярных жидкостях кроме примесей электропроводность создается диссоциированными ионами самой жидкости, поэтому её проводимость по сравнению с неполярными средами возрастает. С повышением диэлектрической проницаемости проводимость также возрастает. Очистка жидкостей от примесей уменьшает их проводимость.

Удельная электрическая проводимость жидкого диэлектрика часто экспоненциально зависит от температуры. Её рост вызывается уменьшением вязкости, приводящей к возрастанию подвижности ионов, и ростом степени диссоциации. В ярко выраженной форме ионная электропроводность наблюдается в растворах и расплавах электролитов на основе солей, кислот, щелочей, молекулы которых легко подвергаются электролитической диссоциации, т.е. расщепляются на катионы и анионы.

При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т.е. перенос вещества, связанный с образованием на электродах новых химических веществ. Под действием внешнего электрического поля анионы и катионы движутся в противоположных направлениях, так что общая электропроводность равна сумме анионной и катионной. Вообще, если ток обусловлен i заряженными частицами разного происхождения, то результирующая удельная электропроводность

$$\gamma = \sum_i n_i q_i \mu_i, \quad (10)$$

где n_i – концентрация носителей того или иного вида, имеющих массу m_i и дрейфовую скорость $v_{срi}$, q_i – их заряд, причём

$$\mu_i = \frac{v_{срi}}{E} = \frac{q_i \tau_i}{m_i}, \quad (11)$$

где μ_i – подвижность того или иного носителя в электрическом поле напряжённостью E при среднем времени свободного пробега τ_i .

Доля общего количества электричества, переносимая анионами и катионами, называется числом переноса анионов или катионов. Очевидно, что сумма обоих чисел переноса равна единице. В частных случаях в движении может принимать

участие только один вид иона, обычно меньший по геометрическим размерам, поэтому он более легкоподвижный, так что число переноса этого иона равно единице. Лишь при повышении температуры и соответствующем понижении вязкости вещества начнет двигаться и другой ион. В недостаточно очищенных жидкостях или жидкостях с присадками электропроводность может определяться электролизом примесей или присадок.

Экспериментально доказано, что понижение вязкости при повышении температуры ведет к увеличению γ как при ионной, так и при молионной электропроводности [5, 6]. Концентрация свободных носителей в случае молионной электропроводности при повышении температуры практически не изменяется, а в случае ионной может возрастать вследствие тепловой диссоциации молекул, что также ведет к увеличению γ .

Известно, что для данного вещества с ионным характером электропроводности при изменении температуры и, следовательно, вязкости η иногда соблюдается «правило Вальдена–Писаржевского» [5, 6]:

$$\gamma\eta = \text{const}. \quad (12)$$

Френкель [10] отмечает, что «правило» справедливо для расплавленных растворов сильных электролитов и вытекает из того, что подвижность ионов обратно пропорциональна вязкости растворителя.

В кристаллическом и стеклообразном состояниях, а иногда и в жидкостях зависимость $\ln \eta = f(1/T)$ в случае ионного механизма электропроводности может быть представлена прямой линией [10], так как

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{W_e}{kT}\right), \quad (13)$$

где γ_0 – постоянная, W_e – энергия активации электропроводности, T – температура, k – постоянная Больцмана. Очевидно, что «правило Вальдена–Писаржевского» будет выполняться, если энергии активации ионной электропроводности и вязкости среды совпадают.

3. Результаты эксперимента

Необходимые для обсуждения результаты измерения емкости заполненной моторным маслом ячейки и тангенса угла диэлектрических потерь были получены с помощью прецизионного измерителя импеданса двухполосников WK 65120B. При этом сосуд, в который помещался конденсатор КПВ-50 пФ, наполнялся тем или иным исследуемым маслом.

Для измерения электрофизических свойств были выбраны четыре всесезонные синтетические моторные масла, изготовленные известными производителями по различным технологиям: Castrol

Edge Professional Long Life 5W-30 (масло 1), Castrol Magnatec 5W-30 (масло 2), Shell Helix Ultra 5W-40 (масло 3), Ravenol 5W-40 (масло 4).

В табл. 1 приведены основные физико-технические характеристики исследованных моторных масел на основе данных производителей. Анализ таблицы показывает, что с увеличением числа после дефиса при стандартных температурах 40 и 100 °С, которые приняты при исследовании масел, кинематическая вязкость возрастает, а также увеличивается индекс вязкости. Наименьшее щелочное число мы видим у Castrol Edge Professional Long Life 5W-30.

Таблица 1. Основные физико-технические характеристики исследованных моторных масел

Характеристика масла	Масло 1	Масло 2	Масло 3	Масло 4
Плотность при 15 °С, г/см ³	0.851	0.852	0.84	0.851
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	70	65.8	79.9	89.3
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	12	11.4	13.2	14.1
Динамическая вязкость при -30 °С, сПа	5800	5860	5631	5100
Индекс вязкости	160	164	168	170
Щелочное число, мг КОН/г	6.0	11.3	-	10.0

При обсуждении результатов предполагалось, что дисперсионная среда (базовое масло) является идеальным диэлектриком, а электропроводность обеспечивается ионогенными присадками. Другими словами, в идеальный диэлектрик внесено небольшое количество носителей тока – ионов (концентрация присадок невелика [7]). В этом случае кроме электронной поляризации дисперсионной среды, с нашей точки зрения, в диэлектрической восприимчивости χ появляется вклад за счет электродной поляризации. Суть её состоит в следующем. Анионы и катионы дрейфуют в дисперсионной среде с достаточно высокой подвижностью, но по мере достижения электродов процесс обмена ионов зарядами задерживается. Процессы окисления и восстановления на электродах представляют собой электрохимические реакции, которые характеризуются определенной скоростью и, соответственно, временем обмена зарядами диэлектрик – проводник. Причем уже при достаточно низких частотах электродная поляризация не успевает устанавливаться в течение полупериода переменного напряжения. Если к быстротекающему процессу электронной поляризации добавится электродная поляризация, то измеряемая диэлектрическая

проницаемость и диэлектрическая восприимчивость будут увеличиваться за счет дополнительно деполаризующего поля в формуле (2).

Кроме быстрой электронной поляризации в низкочастотном диапазоне ниже 1 МГц наблюдается дисперсия. Измеряемая диэлектрическая проницаемость увеличивается. Для примера на рис. 1 приведена зависимость диэлектрической проницаемости от частоты при различных температурах в масле 2. Видно, что при частотах в несколько сот герц измеряемая диэлектрическая проницаемость масла 2 при повышении температуры уменьшается, а дисперсия начинает определяться лишь деформационной электронной поляризацией. В соответствии с выводами Москотти и формулой (8) с увеличением температуры плотность масла убывает, что и приводит к уменьшению величины ϵ' при той или иной частоте. Дисперсия, определяемая электродной поляризацией, практически исчезает.

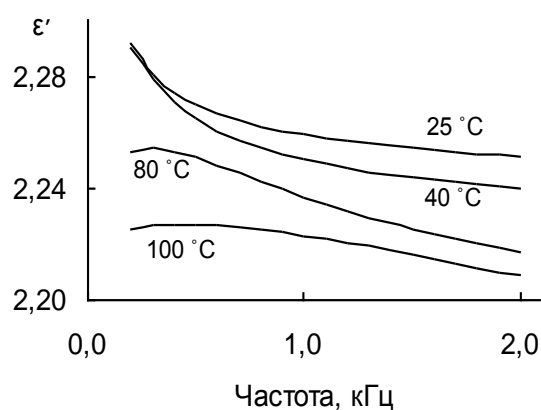


Рис. 1. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости моторного масла Castrol 5W-30 (масло 2)

Предполагаем, что скорость электрохимических реакций окисления и восстановления на электродах увеличивается, что и приводит к постепенному «выключению» деполаризующего электрического поля E_1 в формуле (2). Такие же явления «выключения» E_1 при увеличении температуры наблюдаются в маслах 1, 3 и 4.

Исследование частотной и температурной зависимостей диэлектрических потерь в маслах позволило определить их удельную электрическую проводимость γ . На рис. 2 при нескольких температурах приведены результаты измерения частотной зависимости $\text{tg } \delta$ в образце Castrol Magnatec 5W-30. Видно, что при всех температурах при увеличении частоты $\text{tg } \delta$ гиперболически уменьшается до весьма низких значений, что

определяется ионной проводимостью моторного масла 2.

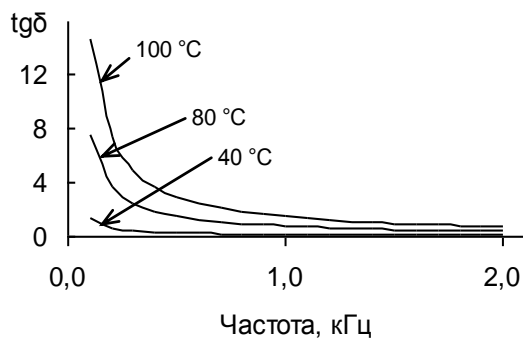


Рис. 2. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь моторного масла Castrol 5W-30 (масло 2)

Если диэлектрические потери определяются ионной проводимостью (проводники второго рода), то [5, 6]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon'}. \quad (14)$$

При измерении частоты в герцах в системе СИ получим удобную при обработке результатов формулу

$$(\varepsilon'')^{-1} = (\varepsilon' \operatorname{tg} \delta)^{-1} \approx \frac{f}{1.8 \cdot 10^{10} \gamma}. \quad (15)$$

На рис. 3 приведены необходимые данные для определения удельной электрической проводимости масла 2 (Castrol Magnatec 5W-30). Оказалось, что при температуре 40 °C $\gamma = 1.75 \cdot 10^{-8}$ См/м. Если линия тренда, как на рис. 3, не линейна в низкочастотном диапазоне, то для вычисления удельной электрической проводимости с помощью формулы (15) необходимо определить первую производную линии тренда при $f = 0$.

Измерения γ были выполнены для всех четырех масел в температурном интервале от 40 до 100 °C. Температурная зависимость γ приведена ниже на рис. 4. Видно, что в системе координат рисунка в указанном температурном интервале зависимость оказывается линейной. Удельные электрические проводимости первых трех масел из списка достаточно близки, тогда как масло Ravenol 5W-40 обладает заметно меньшей проводимостью. Энергии активации ионной проводимости различных масел, полученные с учетом формулы (13), приведены в табл. 2. Предполагаем, что энергия активации определяется тем барьером, который необходимо преодолеть носителям тока в дисперсионной среде и в процессе диссоциации ионогенных присадок.

Еще в начале 20-го в. была замечена корреляция вязкости дисперсных систем, обладающих ионной проводимостью, с их удельным сопротивлением. Эта сильная связь, отмечавшаяся в ранних работах Вальдена, была выражена в виде формулы (12), названной впоследствии «правилом Вальдена–Писаржевского» [5]. В настоящей работе рассмотрено, насколько это правило выполняется для изученных масел.

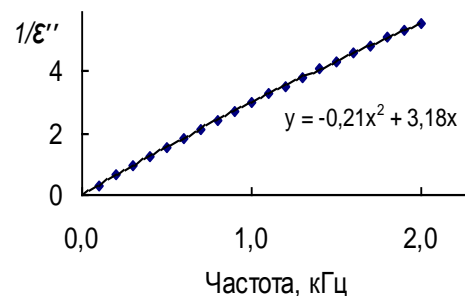


Рис. 3. Зависимость обратного фактора потерь масла 2 от частоты при температуре 40 °C, $y = 1/\varepsilon''$, $x=f$, кГц

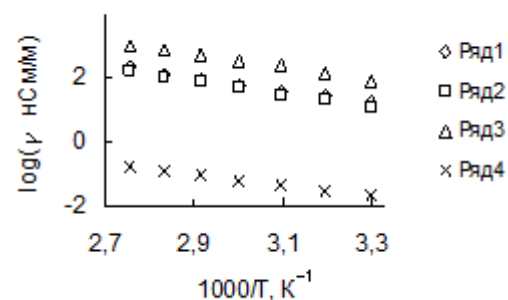


Рис. 4. Температурная зависимость удельной электрической проводимости. Ряды 1–4 относятся к маслам 1–4 соответственно

Таблица 2. Энергии активации проводимостей масел в температурном интервале от 40 до 100 °C

Характеристика масла	Масло 1	Масло 2	Масло 3	Масло 4
$W_e, \text{эВ}$	0.395	0.403	0.379	0.352
$W_b, \text{эВ}$	0.294	0.293	0.301	0.308
m	0.744	0.727	0.794	0.875

Допустим, что в интервале 40–100 °C для вязкости можно воспользоваться соотношением [10]

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{W_e}{kT}\right), \quad (16)$$

где W_e – энергия активации вязкого течения дисперсионной среды, а η_0 – постоянная. Очевидно, что только при условии $W_e = W_e$ «правило» (12) будет выполняться. Пусть (16), как и (13), в интервале температур 40–100 °С выполняются. В случае электропроводности это нами доказано экспериментально (см. рис. 4). Для определения W_e воспользуемся данными табл. 1, а результаты поместим в табл. 2. Видно, что для всех четырех масел энергии активации вязкости и электропроводности разные, причем $W_e < W_e$. Если обозначить отношение $W_e / W_e = m$ (см. табл. 2), то вместо (12) можно записать

$$\gamma^m \eta = \text{const}. \quad (17)$$

Коэффициент корреляции между удельным электрическим сопротивлением масла как обратной величиной удельной электрической проводимости и вязкостью не равен единице. Полагаем, что энергии активации ионной проводимости в изученных маслах определяются не только вязкостью дисперсионной среды (базовых масел), ограничивающей подвижность носителей электрического тока, но и энергией диссоциации ионогенных присадок. Поэтому $W_e > W_e$.

Заключение

На основании результатов работы можно сделать следующие выводы:

1. Все изученные нами моторные масла как дисперсные системы являются неполярными диэлектриками ($\epsilon' < 3$) с ионной проводимостью. Удельная электрическая проводимость, находящаяся для всех масел при $t = 40$ °С в интервале 17–130 нСм/м, к 100°С увеличивается до 0.18–1.12 мкСм/м. Все масла в радиочастотном диапазоне длин волн меньше 100 м обладают электронной поляризацией.

2. Кроме электронной поляризации при частотах ниже 1 МГц проявляется электродная поляризация, вклад которой при нагревании масел постепенно уменьшается, а при температурах 90–100 °С не обнаруживается.

3. Энергии активации электропроводности в интервале температур 40–100 °С (от 0.35 для масла 4 до 0.40 эВ для масла 2) определяются не только влиянием на ионы вязкости среды, но и энергией диссоциации определяющих проводимость ионогенных присадок в дисперсионной среде.

4. Скорость уменьшения удельного электрического сопротивления всех четырех масел при повышении температуры больше по сравнению с темпом падения их вязкости, поэтому «правило Вальдена–Писаржевского» (12) не выполняется. Вычисленный показатель степени m , изменяющийся для разных масел от 0.74 до 0.88 (см.

табл. 2), позволяет записать соотношение $\gamma^m \eta = \text{const}$.

Список литературы

1. *Измestьев И. В., Коняев С. А.* Изменение диэлектрических свойств некоторых моторных масел при их деструкции // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2012. Вып. 1 (19). С. 85–90.
2. *Измestьев И. В., Новиков В. В.* Исследование моторного масла на основе данных эксперимента и моделирования его диэлектрических свойств // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2013. Вып. 1 (23). С. 84–87.
3. *Измestьев И. В., Новиков В. В.* Кинетика образования карбоцепных молекул в среде моторного масла при его эксплуатации по данным магнитной релаксации протонов // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2014. Вып. 1 (26). С. 13–16.
4. *Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А.* Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.
5. *Тареев Б. М.* Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
6. *Борисова М. Э., Койков С. Н.* Физика диэлектриков. Л: Изд-во ЛГУ, 1979. 240 с.
7. *Балтенас Р., Сафонов А. С., Ушаков А. И., Шергалис В.* Моторные масла. М., СПб.: Альфа Лаб, 2000. 272 с.
8. *Киммель Ч.* Введение в физику твёрдого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
9. *Дамаскин Б. Б., Петрий О. А.* Введение в электрохимическую кинетику. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1983. 400 с.
10. *Френкель Я. И.* Кинетическая теория жидкостей. Л: Наука, 1975. 592 с.

References

1. *Izmestiev I. V., Konyaev S. A.* Change of dielectric properties some engine oils at their destruction. *Bulletin of Perm University. Series: Physics.* 2012, no. 1 (19), pp. 85–90. (In Russian).
2. *Izmestiev I. V., Novikov V. V.* Examination of engine oil on the basis of experiment data and modeling of its dielectric properties. *Bulletin of Perm University. Series: Physics.* 2013, no. 1 (23), pp. 84–87. (In Russian).
3. *Izmestiev I. V., Novikov V. V.* Kinetics of formation carbon backbone chains in a medium of engine oil at its operation according to magnetic relaxation of protons. *Bulletin of Perm University. Series: Physics.* 2014, no. 1 (26), pp. 13–16. (In Russian).
4. *Shchukin E. D., Pertsov A. V., Amelina E. A.* *Kolloidnaya khimiya* (Colloidal chemistry). Moscow, Vysshaya shkola, 2004. 445 p. (In Russian).

5. Tareev B. M. *Fizika dielektricheskikh materialov* (Physics of dielectric materials). Moscow: Energoizdat, 1982. 320 p. (In Russian).
6. Borisova M. E., Koykov S N. *Fizika dielektrikov* (Physics of dielectrics). Leningrad: Leningrad State University, 1979. 240 p. (In Russian).
7. Baltenas R., Safonov A. S., Ushakov A. I., Shergalis V. *Motornye masla* (Engine oils). Moscow: AlfaLab, 2000. 272 p. (In Russian).
8. Kittel Ch. *Introduction to Solid State Physics*, 8th ed. New-York.: Wiley, 2004. 704 p.
9. Damaskin B. B., Petriy O. A. *Vvedenie v elektrokhimicheskuyu kinetiku* (Introduction to the electrochemical kinetics), 2nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 1983. 400 p. (In Russian).
10. Frenkel J. *Kinetic theory of liquids*. Mineola: Dover Publications, 1955. 485 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Изместьев И. В., Кожевникова О. А. Поляризация и электропроводность некоторых моторных масел как дисперсных систем // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2016. № 1 (32). С. 43–50. doi: 10.17072/1994-3598-2016-1-43-50

Please cite this article in English as:

Izmetiev I. V., Kozhevnikova O. A. Polarization and electrical conductivity of some engine oils as disperse systems // Bulletin of Perm University. Series: Physics, 2016, no. 1 (32), pp. 43–50. doi: 10.17072/1994-3598-2016-1-43-50