

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА – ДИ(ОКТАФТОРПЕНТИЛОВОГО) ЭФИРА

Хоперскова Л.В.

ФБГОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград,
e-mail: khoperskova@mail.ru

В статье обсуждается возможность использования фторсодержащей жидкости для электроизоляции – ди(октафторпентилового) эфира. Способ получения и свойства позволяют обеспечить низкую стоимость при его производстве и экологическую безопасность при эксплуатации оборудования. Однако в процессе синтеза диэлектрик может содержать примеси полярных газов – SO_2 , HCl . Исследование влияния этого фактора на проводимость ди(октафторпентилового) эфира является целью статьи. Механизмы возникновения проводимости жидких диэлектриков не до конца изучены, а многообразие физических процессов, инициирующих пробой очень велико. На основе экспериментально измеренной диэлектрической проницаемости производится расчет деформационной поляризации ди(октафторпентилового) эфира. Рассмотрен механизм возникновения тока смещения под воздействием внешнего электрического поля. Показано существенное влияние концентрации примесей на проводимость диэлектрика. Получена оценка деформационной поляризации эфира в зависимости от содержания полярных газов.

Ключевые слова: электроизоляция, ди(октафторпентильный) эфир, деформационная поляризация, ток смещения

ESTIMATION OF THE DEFORMATION POLARIZATION OF LIQUID DIELECTRICS – DI(OKTAFLUORPENTIL) ETHER

Khoperskova L.V.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: khoperskova@mail.ru

The article discusses the possibility of using a fluorine-containing liquid for electrical insulation – di(octafluoropentyl) ether. The method of production and properties allow to provide low cost in its production and environmental safety in the operation of equipment. However, in the process of synthesis, a dielectric can contain impurities of polar gases – SO_2 , HCl . An investigation of the effect of this factor on the conductivity of di(octafluoropentyl) ether is the goal of the article. The mechanisms of the appearance of conductivity of liquid dielectrics have not been fully studied, and the variety of physical processes initiating the breakdown is very large. On the basis of the experimentally measured dielectric constant, the deformation polarization of di(octafluoropentyl) ether is calculated. The mechanism of the displacement current generation under the influence of an external electric field is considered. A significant influence of the impurity concentration on the dielectric conductivity is shown.

Keywords: electrical insulation, di(octafluoropentil) ether, deformation polarization, displacement current

Разработки перспективных жидких диэлектриков с целью замены трансформаторного масла, используемого в электроэнергетике, ведутся постоянно. Очевидно, целью является не только улучшение экономических показателей эксплуатации оборудования, но и повышение надежности и экологической безопасности [1, 3, 6]. Использование фторсодержащих жидкостей для электрической изоляции силового электроэнергетического оборудования определяется их негорючестью, высокой химической, окислительной и термической стабильностью, высокими электрофизическими и теплопередающими свойствами. Перфторированные органические соединения, в частности, перфтортрансформаторное масло, получают методом электрохимического фторирования, введением фтора в органический субстрат с помощью электродной реакции. Такая многостадийная процедура характеризуется значительной стоимостью, а само соединение имеет высокую токсичность при высоких температурах, сильную летучесть [4].

Установлено, что ди(октафторпентильный) эфир $[\text{H}(\text{CF}_2)_4\text{CH}_2]_2\text{O}$, относящийся к полифторированным соединениям и может успешно применяться в качестве жидкого диэлектрика [4, 6]. Получение этого вещества не требует больших затрат, а проведенные исследования показывают, что по своим свойствам этот простой эфир не уступает перфтортрансформаторному маслу. Молекула ди(октафторпентилового) эфира содержит шесть атомов водорода, участвующих в процессе окисления кислородом атмосферного воздуха, что препятствует попаданию вещества в озоновый слой атмосферы.

Экспериментальными исследованиями установлены следующие электроизолирующие свойства ди(октафторпентилового) эфира: электрическая прочность $E_{\text{пр}} = 50$ кВ/мм при достигнутой степени очистки (99,95%), удельная проводимость $\sigma = 10^{12}$ Ом·м, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 10^{-4}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 7,65 \div 7,97$, а электроизолирующие свойства диэлектри-

ка существенно зависят от степени очистки от примесей. Способ получения эфира описан в [4]. В результате синтеза эфира в составе полученного вещества остаются кислород и полярные газы (SO₂, HCl). Очистка осуществляется на сорбенте марки СаА-У в токе сухого азота. В результате, в составе предлагаемого жидкого диэлектрика, являющегося неполярным соединением, присутствуют молекулы полярных газов.

Механизмы возникновения проводимости жидких диэлектриков не до конца изучены, а многообразие физических процессов, инициирующих пробой очень велико [1, 3, 7]. Одно из таких явлений – возникновение тока смещения, обусловленного поляризацией вещества. Плотность тока смещения $\vec{j}_{см}$ зависит от изменения электрического поля и поляризации вещества [2]:

$$\vec{j}_{см} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{E} – вектор напряженности внешнего электрического поля, \vec{P} – вектор поляризации вещества. Ток смещения отличен от нуля лишь в момент наложения и снятия постоянного поля, а при переменных воздействиях этот ток существует в любой момент времени. Поэтому анализ поляризационных свойств ди(октафторпентилового) эфира может способствовать объяснению его высоких электроизолирующих свойств, а также найти оптимальные условия его применения.

Будем считать, что в предполагаемом диапазоне частот электрических полей вещество сохраняет свои изоляционные свойства. Для оценки воспользуемся максвелловским временем диэлектрической релаксации [3]: $\tau = \epsilon \epsilon_0 \sigma$. При $\tau \gg \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi f}$ вещество ведет себя как диэлектрик, при $\tau \ll \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi f}$ – как проводник. При $\epsilon_3 = 7,8$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и удельном сопротивлении $\sigma_3 = 10^{12}$ Ом·м получаем $\tau_3 \approx 70$ с. Характерное время, определяемое промышленной частотой ($f = 50$ Гц), равно $\frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ с и условие сохранения изоляционных свойств выполняется. Сравним с хорошо очищенным трансформаторным маслом ($\epsilon_m = 2,2$; $\sigma_m = 10^{12}$ Ом·м, $\tau_m \approx 20$ с), видим, что эфир имеет лучшие характеристики как диэлектрик. Кроме того предположим, что примеси распределены по объему равномерно, и, как следствие, характеристики полярных газов (диэлектрическая проницаемость и плотность) не изменяются в данном диапазоне частот поля, температур и давлений.

Поляризация вещества определяется суммой деформационной (электронной) поляризации P_d и ориентационной поляризации P_{op} : $P_{\Sigma} = P_d + P_{op}$. Деформационная поляризация возникает вследствие деформации электронных оболочек молекул и смещением атомных ядер, фактически раздвижением центров положительного и отрицательного электричества в молекуле, увеличением дипольного момента. Происходит она практически мгновенно, также мгновенно исчезает после снятия электрического поля. Ориентационная поляризация обусловлена разворотом диполей по направлению поля, их ориентацией. Естественно, эта поляризация не может происходить мгновенно, для ее осуществления требуется определенное время, существенно большее, чем время деформационной поляризации [2, 5]. Поскольку молекулы неполярного диэлектрика не обладают собственным дипольным моментом, то для ди(октафторпентилового) эфира $P_{op} = 0$.

Формула Клаузиуса-Мосотти [2, 5]^{op} устанавливает зависимость диэлектрической проницаемости от поляризуемости молекул неполярных диэлектриков, не имеющих постоянных дипольных моментов по измеренным значениям параметров жидкости:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N_A}{3} \cdot \alpha, \quad (2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, M – молярная масса, ρ – плотность, α – поляризуемость вещества, N_A – число Авогадро ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹). Введем обозначение деформационной поляризации P_d :

$$P_d = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho}. \quad (3)$$

Диэлектрическая проницаемость полярных газов зависит не только от поляризуемости молекул, но и от величин их постоянных дипольных моментов μ_0 и от их ориентации в электрическом поле. Для простейшего случая газообразных полярных диэлектриков справедливо уравнение Дебая [2, 5]:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N_A}{3} \cdot \alpha + 4\pi N_A \cdot \frac{\mu_0^2}{9kT}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К), T – абсолютная температура. В (4) первое слагаемое определяет деформационную поляризацию, второе – ориентационную с $P_d = \frac{4\pi N_A}{3} \cdot \alpha$; $P_o = 4\pi N_A \cdot \frac{\mu_0^2}{9kT}$. Вклад ориентационной поляризации полярных газов в общую является предметом дополнительных исследований.

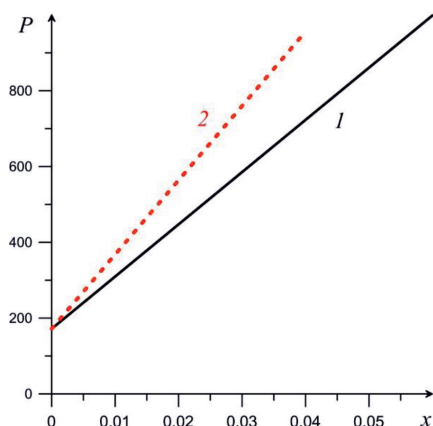


Рис. 1. Абсолютные значения поляризации эфира, г/см^3 , в зависимости от содержания примесей полярных газов: 1 – HCl ; 2 – SO_2

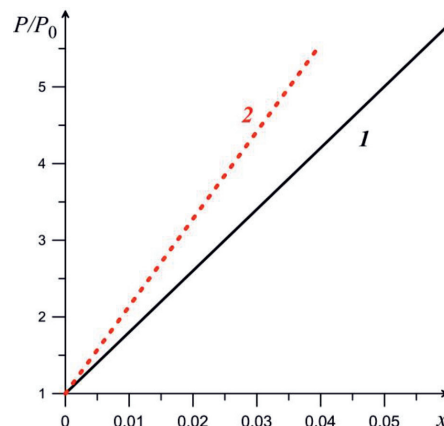


Рис. 2. Относительные значения поляризации эфира в зависимости от содержания примесей полярных газов: 1 – HCl ; 2 – SO_2

Для определения деформационной поляризации ди(октафторпентилового) эфира будем использовать его молярную массу и плотность, а также среднее значение измеренной относительной диэлектрической проницаемости: $M_{\text{Э}} = 446 \text{ г/моль}$; $\rho_{\text{Э}} = 1,8 \text{ г/см}^3$; $\varepsilon_{\text{Э}} = 7,8$. При этом предположим, что достигнутая степень очистки от примесей, составляющая 99,95%, позволяет считать вещество эфира однокомпонентным. Тогда деформационная поляризация чистого эфира в соответствии с (3) $P_{\text{д,Э}} = 172 \text{ см}^3/\text{моль}$. Проведем аналогичные вычисления для чистых полярных газов, молярные массы, плотности и диэлектрические проницаемости которых соответственно равны $M_{\text{SO}_2} = 64,1 \text{ г/моль}$; $M_{\text{HCl}} = 36,5 \text{ г/моль}$; $\rho_{\text{SO}_2} = 0,00263 \text{ г/см}^3$; $\rho_{\text{HCl}} = 0,00149 \text{ г/см}^3$; $\varepsilon_{\text{SO}_2} = 14$; $\varepsilon_{\text{HCl}} = 4,97$. Получаем: $P_{\text{д,SO}_2} = 1,977 \cdot 10^4 \text{ см}^3/\text{моль}$, $P_{\text{д,HCl}} = 1,395 \cdot 10^4 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Рассмотрим влияние примесей на деформационную поляризацию ди(октафторпентилового) эфира. Для расчета эффективной поляризации смеси предполагается, что ее отдельные компоненты не вступают друг с другом в химические реакции и смесь является физической. Обозначая через x и $(x - 1)$ доли объемного содержания (объемные концентрации) примеси и основного вещества соответственно, будем использовать соотношение:

$$P_{12} = P_1(x - 1) + P_2x. \quad (5)$$

Тогда эффективные поляризации смесей эфир- SO_2 и эфир- HCl :

$$P_{\text{Э-SO}_2} = P_{\text{д,Э}}(x - 1) + P_{\text{д,SO}_2}x, \quad (6)$$

$$P_{\text{Э-HCl}} = P_{\text{д,Э}}(x - 1) + P_{\text{д,HCl}}x. \quad (7)$$

Снижая степень очистки от одного до пяти процентов в соответствии с (4) и (6), получим зависимости поляризации двухкомпонентного диэлектрика (рис. 1).

На рис. 2 показано изменение поляризации двухкомпонентной смеси по отношению к поляризации чистого диэлектрика (P_0) от степени очистки. Линейный характер показывает существенное влияние примеси полярных газов на поляризацию диэлектрика. Так содержание примесей в пределах пяти процентов приводит к увеличению деформационной поляризации в среднем в пять раз.

Получена оценка деформационной поляризации ди(октафторпентилового) эфира и показано ее линейное увеличение с ростом концентрации примесей полярных газов. Поскольку плотность тока смещения $\vec{j}_{\text{см}}$ существенно зависит от изменения поляризации вещества, то учет этого фактора необходим при создании модели проводимости и ограничений по степени очистки.

Список литературы

1. Беляев В.Л. Особенности конструкций и работы многоамперных электрических аппаратов: учеб. пособие / В.Л. Беляев; СПб.: СЗТУ. Санкт-Петербург, 2005. – 274 с.
2. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии / Б.В. Иоффе. – Л.: Гос. научно-техн. изд-во хим. лит., 1960. – 382 с.
3. Коробейников С.М. Диэлектрические материалы: учеб. пособие / С.М. Коробейников; НГУ. – Новосибирск, 2012. – 67 с.
4. Патент РФ № 2509384 РФ, МПК H01B3/20, H01B3/42. Электроизолирующая жидкость / А.И. Рахимов, В.П. Заярный, Д.Д. Молдавский, Л.В. Хоперскова, А.В. Мирошниченко, В.К. Михайлов, В.Е. Аввакумов; ВолгГТУ. – 2014.
5. Путинцев Д.Н. Деформационная поляризация вещества / Путинцев Д.Н., Путинцев Н.М. // Журнал физической химии. 2007. Т. 81. № 4. С. 660-666.
6. Рахимов А.И. Способ повышения эксплуатационных характеристик высоковольтного электротехнического оборудования / Рахимов А.И., Заярный В.П., Хоперскова Л.В. // Известия ВолгГТУ. Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки». Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – № 18 (145). – С. 66-68.
7. Ушаков В.Я. Физика пробоя жидких диэлектриков / В.Я. Ушаков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 80-87.