

06

Анализ релаксационных процессов методом математического моделирования

© М.Э. Борисова, Ю.К. Осина

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: julia_npf@list.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2014 г.

Исследование механизмов накопления и релаксации заряда в электроизоляционных пленках сшитого полиэтилена до и после термостарения произведено методом токов термостимулированной деполяризации. Показано, что стабильность электретоного состояния в образцах с силанольносшитым полиэтиленом выше, чем у образцов с пероксидносшитым полиэтиленом. Анализ спектров токов проведен методом математического моделирования. Определены механизмы релаксации заряда в пленках сшитого полиэтилена.

Постоянно растет спрос на максимально надежное энергетическое оборудование [1], вследствие чего повышаются требования к качеству кабельной продукции [2]. Разрабатываются новые изоляционные материалы, обладающие улучшенными механическими и электрическими свойствами [3,4], наибольшее распространение получил сшитый полиэтилен (СПЭ).

Цель работы заключалась в изучении процессов накопления и релаксации заряда в изоляции СПЭ различной химической сшивки. Интерес к этим явлениям обусловлен тем, что накопленный в изоляции заряд приводит к искажению электрического поля, что влияет на электрическую прочность и ресурс работы материала [5,6]. До последнего времени остается неясным вопрос об использовании кабелей из СПЭ на постоянном напряжении.

Таблица 1. Характерные температуры максимумов токов ТСД для разных образцов

	ПСПЭ	ССПЭ	ПСПЭ (состаренные)	ССПЭ (состаренные)
$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	78	65	78	54

В качестве объекта исследования были взяты непосредственно срезанные с изоляции кабелей пленки с пероксидноштитой изоляцией — композиция марки HFDK 4201 SC компании Dow Wire and Cable (ПСПЭ) и с силанольноштитой изоляцией — композиция марки LE 4421 (95%) и катализатора LE 4431 (5%) компании Borealis (ССПЭ), толщиной $h = 45 \mu\text{m}$, диаметром $d = 26 \text{ mm}$.

Изучение процессов накопления и релаксации заряда проводилось методом токов термостимулированной деполяризации (ТСД) [7]. Спектры токов ТСД анализируются на основе различных физических моделей [7–9], учитывающих механизм релаксации заряда.

При изучении спектров токов ТСД образцы пленок СПЭ заряжались в коронном разряде до электростатической разности потенциалов $U_e = -400 \text{ V}$. Измерения токов ТСД проводились в открытой цепи, при скорости нагрева $\beta = 1 \text{ K/min}$.

Испытания проведены на серии идентичных образцов, как исходных, так и подверженных термостарению (выдержка при температуре 90°C более 400 h). Зависимости $I = f(T)$ для исходных (*a*) и подверженных термостарению (*b*) образцов приведены на рис. 1, из которого видно, что в спектрах токов ТСД у образцов СПЭ с разным типом сшивки есть существенные различия по величине температуры максимума тока (табл. 1) и по форме кривой (рис. 1). Природа химической сшивки оказывает существенное влияние на характер спектра тока ТСД (рис. 1, *a*). Процесс термостарения изменяет спектр токов ТСД (рис. 1, *b*).

Величины поверхностной плотности зарядов при одном и том же режиме зарядки, определяемые с помощью соотношения: $\sigma_{eff} = (\epsilon\epsilon_0 U_e)/h$ у образцов ПСПЭ и ССПЭ до и после термостарения, оказались близкими, что свидетельствует об одинаковой способности материалов накапливать заряд.

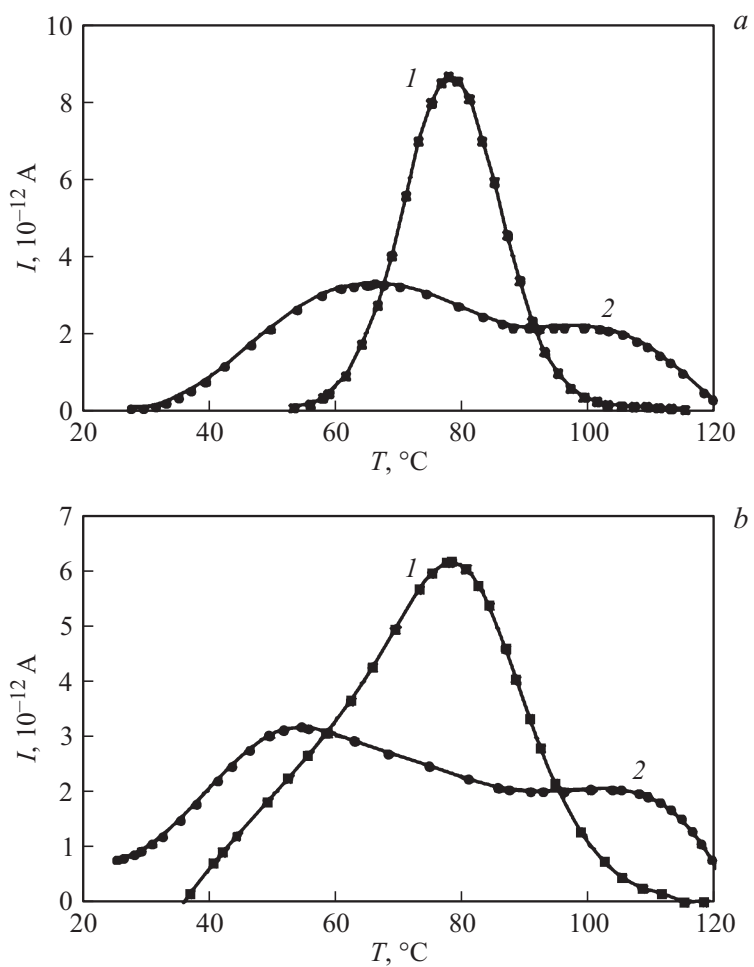


Рис. 1. Спектры токов ТСД до (а) и после (б) термостарения: 1 — ПСПЭ, 2 — ССПЭ.

Время, за которое заряд полностью релаксирует при постоянной скорости нагрева $\beta = 1 \text{ K/min}$, определялось выражением $t = (T - T_0)/\beta$ и составило для исходных образцов ПСПЭ — 3300 с и для ССПЭ —

5900 s, а после термостарения ПСПЭ — 4900 s и ССПЭ — 6200 s. Процесс термостарения увеличивает время, за которое заряд релаксирует, только у образцов ПСПЭ в 1.5 раза, а у образцов ССПЭ оно не изменяется.

Спектры токов ТСД часто имеют сложный характер. Они могут содержать несколько перекрывающихся максимумов, описывающихся кинетикой 1-го порядка. Отдельный максимум кривой тока ТСД в этом случае описывается полученным нами выражением [7]

$$j_{\text{TSD}} = j_m \exp \left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] \times \exp \left\{ -\frac{W}{kT_m^2} \int_{T_m}^T \exp \left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] dT \right\}, \quad (1)$$

где плотность тока в максимуме j_m

$$j_m = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \varepsilon_{lay} U_{e0}}{(\varepsilon h_{lay} + \varepsilon_{lay} h) \tau_m} \times \exp \left\{ -\frac{W}{kT_m^2} \int_{T_0}^{T_m} \exp \left[\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right) \right] dT \right\}, \quad (2)$$

$$\tau = \tau_m \exp \left(\frac{W}{kT} - \frac{W}{kT_m} \right), \quad (3)$$

ε_{lay} и h_{lay} — диэлектрическая проницаемость и толщина прокладки; k — постоянная Больцмана; T — конечная температура.

Анализ токов ТСД (рис. 1) производился методом компьютерного моделирования в среде Mathcad. Экспериментально измеренная зависимость тока ТСД сравнивалась с теоретически рассчитанной. Разложить сложную кривую на отдельные дебаевские стандартные максимумы можно с учетом принципа суперпозиции токов. Анализ сложного спектра осуществлялся посредством суммирования элементарных пиков, имеющих определенные значения энергии активации W , плотности тока в максимуме j_m и температуры максимума T_m .

Разложение полученных нами спектров на отдельные дебаевские стандартные максимумы, которые описываются кинетикой релаксации

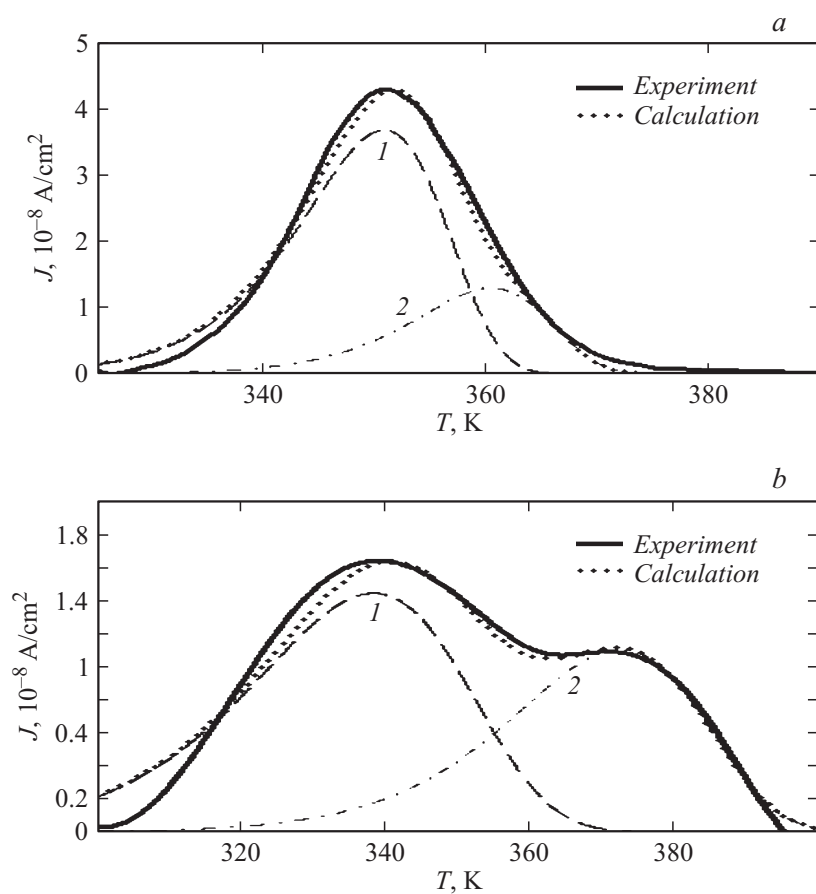


Рис. 2. Разложение спектра ТСД исходных пленок ПСПЭ (а) и ССПЭ (b) на дискретные максимумы.

заряда 1-го порядка, производилось путем математического моделирования процессов неизотермической релаксации. Варьируя величины W , j_m и T_m , добиваемся совпадения измеренной и расчетной зависимостей плотности тока ТСД. На рис. 2 приведен пример разложения кривой плотности тока ТСД для исходных образцов СПЭ. Как видно из рисунка,

Таблица 2. Параметры разложения спектров

Максимум	$J_m, 10^{-8} \text{ A/m}^2$	$T_m, \text{ K}$	$W, \text{ eV}$
ПСПЭ			
1-й	3.7	351	1.60
2-й	1.3	360	1.80
ССПЭ			
1-й	1.45	338	0.63
2-й	1.11	372	0.86

спектры плотности токов ТСД имеют два максимума. Параметры разложения спектров представлены в табл. 2.

Величина энергии активации пленок ССПЭ, определенная из температурной зависимости проводимости, составляет 0.85 eV, т.е. она практически совпадает с энергией активации высокотемпературного максимума спектра ТСД (табл. 2). Равенство энергий активации свидетельствует о том, что релаксация заряда в области высоких температур у образцов ПСПЭ и ССПЭ происходит за счет собственной проводимости диэлектрика.

Из зависимостей $I = f(T)$ каждого дебаевского максимума исходных образцов СПЭ были определены времена релаксации заряда при максимальной температуре τ_m , которые легко можно рассчитать из кривых тока ТСД с помощью выражения

$$\tau(T) = \frac{1}{\beta} \left(\frac{Q(T)}{j(T)} \right), \quad (4)$$

где $Q(T)$ — остаточный в диэлектрике заряд.

Времена релаксации в области низкотемпературного и высокотемпературного максимумов практически одинаковы для ПСПЭ и ССПЭ. При этом $\tau_1 = 400$ и $\tau_2 = 380$ s для ПСПЭ, а для ССПЭ $\tau_1 = 930$ и $\tau_2 = 830$ s соответственно. Следовательно, заряд, накапливаемый в образцах ССПЭ, наиболее стабилен.

Таким образом, установлено, что стабильность электрретного состояния, т.е. времена релаксации заряда в полиэтиленах с пероксидной и силанольной сшивкой различны.

Показано, что низкотемпературный максимум спектров токов ТСД связан с процессом освобождения носителей заряда с ловушек, а высокотемпературный — с собственной проводимостью диэлектрика. Установлено, что время релаксации заряда у образцов ПСПЭ меньше, чем у ССПЭ. Следовательно, способность удерживать заряд в периксидносшитой изоляции кабеля меньше, чем в силанольносшитой изоляции.

Список литературы

- [1] *Иванов Г.А., Бобыль А.В., Еришенко Е.М., Теруков Е.И.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 10. С. 63–67.
- [2] *Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н.* // Электро. 2014. № 5. С. 2–7.
- [3] *Кольцова Т.С., Шахов Ф.М., Возняковский А.А., Ляшков Л.Н.* и др. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 11. С. 47–51.
- [4] *Бустром Дж.О., Кампус А.* и др. // Наука и техника. 2005. № 5 (294). С. 7–21.
- [5] *Борисова М.Э., Осина Ю.К.* // Материалы XIII Междунар. конф. „Физика диэлектриков“ (Диэлектрики-2014). СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014. Т. 1. С. 42–43.
- [6] *Stancu C., Notingher P.V.* // U.P.B. Sci. Bull. Ser. C. 2010. V. 72. Iss. 2. P. 161–170.
- [7] *Борисова М.Э., Галичин Н.А.* // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2009. № 11 (79). С. 119–128.
- [8] *Sessler G.M.* Distribution and Transport of Charge in Polymers // Electrets. 3rd ed. V. 2. California: Laplacian Press, 1999. P. 1–80.
- [9] *Taylor D.M.* (ed.). Electrostatics: Inst. Phys. Conf. Ser. V. 163. Bristol: Institute of Physics Press, 1999.