

06
Долговечность полимеров в переменном электрическом поле

© В.А. Закревский,¹ В.А. Пахотин,¹ Н.Т. Сударь²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 июня 2019 г.
В окончательной редакции 3 июня 2019 г.
Принято к публикации 26 августа 2019 г.

Предложено объяснение различия электропрочностных свойств полимеров в постоянном и переменном электрических полях. Выделение энергии при рекомбинации инжектированных в полимерный диэлектрик электронов и дырок рассматривается как фактор, ускоряющий процессы электрического старения этих диэлектриков в переменном электрическом поле. Показано, что безызлучательная релаксация электронных возбужденных состояний вызывает разрывы связей в макромолекулах и образование свободных радикалов. Вследствие более низкой энергии ионизации свободных радикалов (по сравнению с исходными молекулами) скорость накопления зарядов в полимерном диэлектрике возрастает, что приводит к снижению его долговечности в переменном электрическом поле по сравнению с долговечностью полимеров в постоянном электрическом поле.

Ключевые слова: полимеры, электрический пробой, электролюминесценция, свободные радикалы, твердотельная плазма, эффект экранирования.

DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48818.224-19

Введение

Полимерные диэлектрики находят широкое применение в различных устройствах и приборах в качестве диэлектрических и изоляционных слоев, что определяет повышенный интерес к изучению их электропрочностных свойств. Исследования в этом направлении продолжаются в течение нескольких десятилетий, но общепринятая точка зрения на природу электрической прочности полимеров в настоящее время отсутствует [1].

Недавно был предложен так называемый ионизационный механизм электрического разрушения полимеров, с единых позиций описывающий их старение и пробой вследствие быстрого роста концентрации носителей заряда [2,3]. Разрушение полимеров в постоянном электрическом поле в работах [2,3] рассматривается как следствие накопления квазисвободных зарядов в результате туннельной ионизации макромолекул в сильном электрическом поле. При накоплении в полимере разноименных зарядов возникает эффект экранирования, что приводит к снижению потенциала ионизации молекул и, следовательно, к ускорению их ионизации. Чем выше концентрация носителей заряда, тем выше скорость ионизации и скорость накопления зарядов. Развитие этого самоускоряющегося процесса (процесса с положительной обратной связью) при достижении критической концентрации зарядов приводит к резкому изменению свойств полимера — к его пробую.

Эта ситуация подобна той, которая реализуется при термической ионизации атомов и молекул, описываемой

формулой Саха. Термоионизация также резко ускоряется при накоплении зарядов [4].

Выполненные на основе этих представлений оценки долговечности полимерных материалов в постоянном электрическом поле различной напряженности находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными [3]. С позиций ионизационного механизма электрического разрушения полимеров находят также объяснение закономерности импульсного пробоя полимерных диэлектриков [5,6].

Однако полимерная изоляция главным образом используется в переменном поле. Вместе с тем хорошо известно, что электрическая прочность полимерных диэлектриков в переменном электрическом поле существенно ниже, чем в постоянном [7]. Установлено, например, что долговечность полимеров в переменном поле примерно на два порядка величины меньше долговечности в постоянном поле [8,9], что прямо указывает на то, что дефектообразование в полимерах под действием переменного поля происходит гораздо более интенсивно, чем под действием постоянного поля. Следовательно, при рассмотрении разрушения полимеров в переменном электрическом поле необходимо дополнительно учитывать процессы, интенсивно протекающие только в переменном поле.

Настоящая работа посвящена выяснению вопроса о том, возможно ли использовать представления об ионизационном механизме пробоя для описания разрушения полимеров в переменном электрическом поле.

1. Постановка задачи

Известно, что под воздействием сильного электрического поля в полимерных диэлектриках возникает электролюминесценция (ЭЛ). Причиной ее возникновения является рекомбинация электронов с положительными молекулярными ионами (дырками) [10–13]. Интенсивность ЭЛ в переменном электрическом поле существенно выше, чем в постоянном. Благоприятные условия для рекомбинации разноименных зарядов в переменном поле создаются из-за того, что из одного и того же электрода в разные полупериоды инжектируются и электроны и дырки. Рекомбинация при этом происходит в узком приэлектродном слое полимера. Она может рассматриваться как фактор, ускоряющий процессы электрического старения полимеров в переменном поле, который обуславливает снижение электрической долговечности (времени жизни полимеров в электрическом поле) полимерного диэлектрика в переменном поле по сравнению с постоянным. Отметим, что на связь старения полимеров в электрическом поле с ЭЛ ранее указывалось в работах [14–16].

Испускание света в видимом диапазоне является следствием релаксации возбужденных состояний, возникающих при электронно-дырочной рекомбинации. Электронные возбуждения молекул возникают, поскольку энергия ΔE , выделяемая при рекомбинации зарядов, достаточно велика. По оценке [17] при рекомбинации зарядов в конденсированных органических соединениях выделяется энергия 4.5–7.5 eV. Очевидно, что эта энергия превосходит энергию возбуждения фотолюминесценции и энергию разрыва ковалентных химических связей.

При рекомбинации зарядов в соответствие со спиновой статистикой синглетные и триплетные возбужденные состояния образуются в соотношении 1:3. Синглетные состояния релаксируют в основном вследствие излучательных переходов $S_1 \rightarrow S_0$ (флуоресценция). Переходы из триплетных состояний в основное запрещены по спину. Поэтому дезактивация возбужденных триплетных состояний происходит в основном безызлучательно, и их энергия расходуется на инициирование химических превращений, связанных с разрывами химических связей и образованием свободных радикалов. Установлено, что деструкция макромолекул, возбужденных в триплетное состояние, происходит с вероятностью, близкой к единице [18].

Таким образом, в результате безызлучательной релаксации возбужденных триплетных состояний происходят разрывы химических связей в макромолекуле с образованием свободных радикалов (обрывков макромолекул с неспаренными электронами). Образование свободных радикалов в этих условиях наблюдалось в [18].

Ясно, что при рассмотрении воздействия переменного электрического поля на полимеры необходимо учитывать разрывы химических связей в макромолекулах из-за выделения энергии при рекомбинации разноименных

зарядов. Влияние образования свободных радикалов, обладающих высокой химической активностью, на долговечность полимеров в переменном электрическом поле обсуждалось нами ранее в [19]. В настоящей работе будет рассмотрен другой аспект проблемы влияния разрывов химических связей в макромолекулах с образованием свободных радикалов на электропрочностные свойства полимеров. С позиций рассматриваемого здесь ионизационного механизма разрушения полимеров в электрическом поле очень важным является то, что потенциал ионизации свободных радикалов понижен по сравнению с потенциалом ионизации исходных молекул. Поэтому при образовании свободных радикалов процесс формирования в полимерном диэлектрике твердотельной плазмы ускоряется.

Разница в потенциалах ионизации органических молекул и соответствующих радикалов значительна. Так, например, для молекулы метана и метильного радикала она составляет ~ 3 eV [20]. С увеличением размера молекул эта разница падает. Однако для полимерных молекул и их обрывков (свободных макрорадикалов) она неизвестна. Поэтому далее при расчетах мы принимаем, что эта разница Δ_r равна 2 eV.

Скорость образования свободных радикалов при рекомбинации инжектированных зарядов можно оценить на основании литературных данных, полученных при исследовании интенсивности ЭЛ полимеров в переменном электрическом поле. Эта скорость пропорциональна мгновенному значению яркости ЭЛ $J(t)$, т. е.

$$\frac{dn'_r}{dt} = 3 \frac{J(t)}{\beta V_r},$$

где n'_r — концентрация радикалов, образующихся при рекомбинации инжектированных в разные полупериоды напряжения электронов и дырок, β — эффективность регистрации квантов света, V_r — объем области, из которой регистрируется свечение, t — время.

Значение параметра β зависит от геометрии камеры, в которой регистрируется ЭЛ (прежде всего от расстояния между образцом полимера и регистрирующим свет фотоэлектронным умножителем (ФЭУ)), эффективности ФЭУ, преломления света на границе полимер–вакуум. Согласно данным работы [21], $\beta = 10^{-6}$.

Оценим размеры активной области V_r , т. е. области, где развиваются процессы рекомбинации зарядов, и из которой в основном регистрируется свечение. Действующее в полимерном диэлектрике электрическое поле неоднородно. Имеются области усиления поля, например, вблизи неоднородностей на электродах. В этих областях и развиваются процессы разрушения диэлектрика. Пробой полимеров — локализованное явление, характеризующееся образованием узкого канала пробоя. Поэтому процессы разрушения полимеров в электрическом поле наиболее интенсивно развиваются в небольших объемах, размером в несколько кубических микрометров. Таковы объемы разрушения при электрических

испытаниях полимеров в электродной системе игла — плоскость, когда радиус закругления вершины иглы составляет единицы микрометров. В этих условиях также регистрируется ЭЛ, интенсивность которой сопоставима с интенсивность ЭЛ в системе плоских электродов. Объем светящейся области вблизи игольчатого электрода оценивается в $10^{-11} - 10^{10} \text{ cm}^3$ [15,22]. Для дальнейших расчетов примем $V_r = 10^{-11} \text{ cm}^3$.

Известно, что под действием переменного электрического поля свечение в полимерах наблюдается каждый полупериод действующего напряжения. Характер изменения яркости ЭЛ в течение полупериода близок к синусоидальному, причем максимум свечения сдвинут относительно максимума приложенного напряжения на угол $\sim \pi/4$ [10], что позволяет аппроксимировать $J(t)$ выражением

$$J(t) = A \left| \sin \left(2\pi f t - \frac{\pi}{4} \right) \right|, \quad (1)$$

где A — нормировочный множитель, f — частота переменного напряжения. Полагалось, что локальная напряженность электрического поля изменяется во времени как $F(t) = F_0 \sin(2\pi f t)$. Здесь F_0 — амплитуда напряженности переменного поля.

Для определения нормировочного множителя A можно использовать экспериментальные данные о зависимости интегральной яркости ЭЛ J (числа квантов, испущенных за одну секунду) от среднеквадратичного значения напряженности электрического поля F_{rms} . Величина $J(F_{\text{rms}})$ связана с $J(t)$ соотношением $\int_0^1 J(t) dt = J(F_{\text{rms}})$, подставляя в которое выражение (1), получим $A = (\pi/2)J(F_{\text{rms}})$. Экспериментальные данные о $J(F_{\text{rms}})$ для полиэтилентерефталата в переменном поле ($f = 50 \text{ Hz}$) [23] позволяют аппроксимировать зависимость $J(F_{\text{rms}})$ при $F_{\text{rms}} \geq 0.8 \text{ MV/cm}$ соотношением

$$J(F_{\text{rms}}) = G \exp(\alpha F_{\text{rms}}),$$

где $G = 5.4 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 1.14 \text{ cm/MV}$.

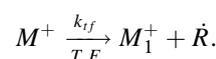
Вследствие наличия в полимере областей усиления поля используемое далее в расчетах значение амплитуды напряженности действующего переменного поля F_0 превышает значение амплитуды переменного электрического поля F_α , определяемого экспериментально и равного $F_\alpha = U_a/d = \sqrt{2}F_{\text{rms}}$ (если U_a — амплитуда переменного напряжения, приложенного к образцу толщиной d). Поэтому $F_0 = qF_\alpha$, где q — коэффициент электрических перенапряжений.

Таким образом, для описания процесса старения и разрушения полимеров в переменном электрическом поле может быть использована следующая система кинетических уравнений, описывающих накопление зарядов в полимере вследствие полевой ионизации макромолекул

и свободных радикалов:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n_{HL}^+ &= k_{HL}(N_0 - n_{HL}^+) - k_{if}n_{HL}^+, \\ \frac{d}{dt} n_r &= k_{if}n_{HL}^+ + 3 \frac{J(t)}{\beta V_r} - k_r n_r, \\ \frac{d}{dt} n_r^+ &= k_r n_r, \\ \frac{d}{dt} n_{if}^+ &= k_{if}n_{HL}^+. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь N_0 — начальная концентрация способных ионизоваться фрагментов молекул (например, мономерных звеньев); n_{HL}^+ — концентрация дырок, образующихся при туннельном переходе в электрическом поле электронов с верхней заполненной молекулярной орбитали (уровня НОМО) на низшую свободную орбиталь соседней молекулы (уровень LUMO) — переход НОМО—LUMO; n_r — концентрация свободных макрорадикалов; n_r^+ — концентрация дырок, образующихся при полевой ионизации макрорадикалов; k_{if} — константа скорости термофлуктуационного разрыва химических связей в положительных макроионах; n_{if}^+ — концентрация ионов и радикалов, образующихся при термофлуктуационном распаде макроионов n_{HL}^+ по схеме



Здесь M^+ и M_1^+ — молекулярные ионы, \dot{R} — свободный радикал, T — температура, F — напряженность электрического поля, действующего на макроион, k_{HL} константы скорости ионизации макромолекул в электрическом поле (константа скорости туннельного электронного перехода НОМО—LUMO); k_r — константа скорости ионизации свободных радикалов в электрическом поле.

Известно, что константа скорости термофлуктуационного разрыва химических связей в положительных макроионах k_{if} экспоненциально зависит от напряженности электрического поля F и энергии разрыва химических связей в макроионе D^+ [24,25]:

$$k_{if} = \tau_0^{-1} \exp \left(- \frac{D^+ - e l_0 F}{k_B T} \right).$$

Здесь e — заряд электрона, l_0 — активационная длина, k_B — постоянная Больцмана, T — температура, $\tau_0 = 10^{-13} \text{ s}$.

В ионизированной макромолекуле энергия разрыва химических межатомных связей понижена. Так, например, энергия разрыва С—С-связи в молекуле этана равна 3.6 eV, а в положительном ионе этана — 1.9 eV [26]. В ионе пропионового ангидрида энергия центральной С—С-связи составляет 2.4 eV, в то время как в нейтральной молекуле пропионового ангидрида $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C(=O)O}$ энергия этой связи равна 2.9 eV [24] (в ионе этой молекулы заряд делокализован по всем его связям).

Характер зависимостей констант скоростей туннельных электронных переходов k_{HL} и k_r от высоты и ширины соответствующих барьеров и напряженности электрического поля приведены в [2,3]. При этом снижение энергии ионизации молекул ΔI при увеличении концентрации зарядов в [2,3] определялось в дебаевском приближении, которое справедливо при сравнительно небольших концентрациях зарядов, т.е. в случае идеальной плазмы. Для неидеальной или коллективной плазмы при повышенных концентрациях зарядов для определения ΔI используются другие модели, учитывающие взаимодействие частиц плазмы. Так, например, для описания свойств неидеальной твердотельной плазмы используется соотношение [4]

$$\Delta I = k_B T \frac{l}{r_D + \frac{1}{8}\Lambda}. \quad (3)$$

Здесь r_D — радиус Дебая, определяемый как

$$r_D = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k_B T}{e^2 n}},$$

где n — концентрация зарядов в твердотельной плазме, определяемая в настоящей работе как суммарная концентрация дырок и электронов, равная $n = 2(n_{HL}^+ + n_{if}^+ + n_r^+)$,

$$l = \frac{e^2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 k_B T}$$

и

$$\Lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}},$$

где h — постоянная Планка, m — масса электрона.

В случае ионизации свободных радикалов снижение барьера, очевидно, равно сумме $\Delta I + \Delta_r$.

Так же как в [3] принималось, что барьеры имеют треугольную форму, а снижение энергии ионизации вследствие эффекта экранирования ΔI рассчитывалось по формуле (3). Таким образом:

$$k_{HL} = \nu_0 \exp \left[-\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3ehF} (E_g - \Delta I)^{3/2} \right]$$

и

$$k_r = \nu_0 \exp \left[-\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3ehF} (E_g - \Delta I - \Delta_r)^{3/2} \right],$$

где ν_0 — частотный фактор, m — масса электрона, $E_g = |E_{\text{НОМО}} - E_{\text{ЛУМО}}|$, если $E_{\text{НОМО}}$ и $E_{\text{ЛУМО}}$ — энергия уровней НОМО и ЛУМО соответственно.

2. Результаты расчетов и их обсуждение

Решение системы (2) позволяет определить изменение концентрации зарядов со временем. При этом предполагается, что концентрация дырок равна концентрации

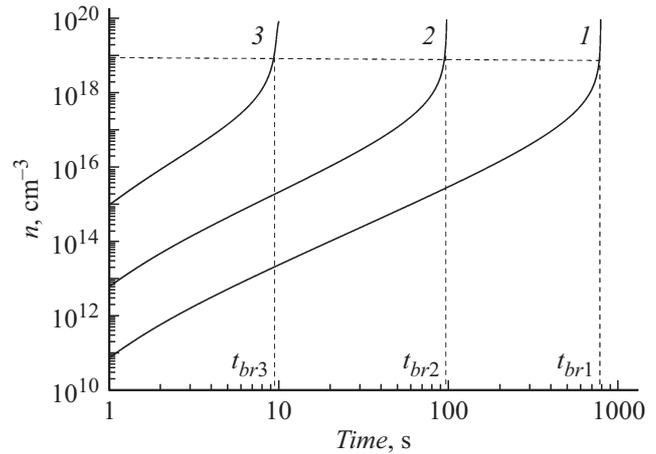


Рис. 1. Изменение полной концентрации положительных молекулярных ионов со временем, F : 1 — 2, 2 — 2.5, 3 — 3 MV/cm.

электронов. Принимается, что время жизни полимера в электрическом поле (долговечность t_{br}), совпадает со временем накопления критической концентрации носителей зарядов n_{cr} , после достижения которой скорость накопления зарядов увеличивается [2,3].

При проведении подобных расчетов в случае переменного поля принималось, что деградация полимера в положительные и отрицательные полупериоды изменения поля протекает с одинаковой скоростью, т.е. при решении системы уравнений (2) полагалось, что $F(t) = F_0 |\sin(2\pi f t)|$, а в качестве начальных условий при $t = 0$, принималось $n_{HL}^+(0) = n_{if}^+(0) = n_r^+(0) = 0$.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $\nu_0 = 10^{16} \text{ s}^{-1}$, $T = 300 \text{ K}$, $D^+ = 1.8 \text{ eV}$, $l_0 = 0.2 \text{ nm}$ [26], $\epsilon = 3$, $N_0 = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, $E_g = 6 \text{ eV}$.

Расчеты показали, что во все моменты времени $n_r^+(t) \gg n_{HL}^+(t) \gg n_{if}^+(t)$, т.е. полная плотность зарядов n в твердотельной плазме, практически определяется концентрацией электронов и дырок, образующихся при полевой ионизации свободных радикалов $n_r^+(t)$. На рис. 1 представлены зависимости $n(t)$, рассчитанные при различных значениях локальной напряженности поля F . Кривые 1–3 соответствуют значениям F равным, 2, 2.5 и 3 MV/cm. Момент пробоя t_{br} определялся нами по резкому возрастанию концентрации дырок, когда $n(t)$ достигало значения $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Данное значение концентрации дырок можно рассматривать как критическую концентрацию n_{cr} , при достижении которой происходит пробой полимерного диэлектрика. Из рисунка видно, что возрастание напряженности поля с 2 до 3 MV/cm приводит к уменьшению долговечности на два порядка величины.

При сопоставлении теоретических величин долговечности с экспериментальными данными необходимо учитывать, что действующее в полимерном диэлектрике поле неоднородно. Имеются области усиления поля, например, вблизи неоднородностей на электродах, ха-

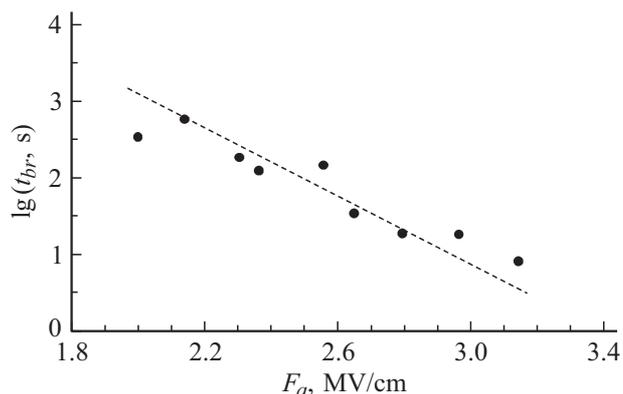


Рис. 2. Зависимость времени до пробоя от напряженности электрического поля в переменном электрическом поле ($f = 50 \text{ Hz}$) пленки полиэтилентерефталата при $T = 300 \text{ K}$. Точки — эксперимент по данным работы [8], штриховая линия — расчет.

рактируемые введенным выше коэффициентом перенапряжений q . Оказалось, что расчетные значения t_{br1} , t_{br2} и t_{br3} удовлетворительно согласуются с представленными на рис. 2 экспериментальными значениями t_{br} (они получены авторами [8] для пленок полиэтилентерефталата при $T = 300 \text{ K}$ на частоте 50 Hz) при величинах q , равных соответственно 3.82, 3.31 и 3.05.

Тот факт, что величина q падает с увеличением напряженности поля, свидетельствует, по-видимому, о влиянии объемного заряда (ОЗ) на величину q [27]. ОЗ эффективно накапливается при увеличении напряженности поля в результате чего снижается напряженность вблизи неоднородностей на электродах. Величина $q = 3-4$ представляется вполне разумной и физически оправданной.

Таким образом, предложенный механизм разрушения полимеров в переменном электрическом поле позволил непротиворечиво объяснить имеющиеся в литературе данные об электрической долговечности полимеров в переменном поле.

Заключение

С позиций ионизационного механизма разрушения полимеров в электрическом поле нашло объяснение резкое различие электропрочностных свойств полимеров в постоянном и переменном электрических полях. Показано, что уменьшение долговечности полимеров в переменном поле обусловлено деструкционными процессами, инициированными рекомбинацией носителей зарядов, сопровождающейся выделением в каждом акте рекомбинации энергии в несколько электронвольт. Безызлучательная релаксация электронных возбужденных состояний (триплетных экситонов) инициирует разрывы связей в макромолекулах и образование свободных радикалов. Вследствие более низкой энергии ионизации

свободных радикалов (по сравнению с исходными молекулами) скорость накопления зарядов в полимерном диэлектрике возрастает, что приводит к снижению его долговечности в переменном электрическом поле по сравнению с долговечностью полимеров в постоянном электрическом поле.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peter Peregrinus, 1992. p. 589.
- [2] Закревский В.А., Сударь Н.Т. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 7. С. 1298–1303. [Zakrevskii V. A., Sudar' N.T. // Physics Solid State. 2013. Vol. 55. N 7. P. 1395–1400. DOI: 10.1134/S1063783413070354]
- [3] Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar N.T. // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 85. N 23. P. 234101. DOI: 10.1063/1.4883365
- [4] Эбелинг В., Крефт В., Кремл Д. Теория связанных состояний и ионизационного равновесия в плазме и твердом теле. М.: Мир, 1979. 264 с.
- [5] Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 249–253. DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44133.1907 [Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T. // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 2. P. 276–281. DOI: 10.1134/S1063784217020281]
- [6] Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т. // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 1. С. 120–125. DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44133.1907 [Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T. // Tech. Phys. 2018. Vol. 63. N 12. P. 1814–1819. DOI: 10.1134/S1063784219010262]
- [7] Abdelkrim Laifaoui, Mohend Seghir Herzine, Youcef Zebboudj, Jean-Michel Reboul, Mohammed Nedjar // IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul. 2014. Vol. 21. P. 2267–2273. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004190
- [8] Бережанский В.Б., Быков В.М., Городов В.В., Закревский В.А., Слуцкер А.И. // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1986. Т. 28. № 10. С. 2163–2169. [Berezhanskii V.B., Bykov V.M., Gorodov V.V., Zakrevskii V.A., Slutsker A.I. // Polymer Science USSR. 1986. Vol. 28. N 10. P. 2404–2411.]
- [9] Mazzanti G., Montanari G.C., Dissado L.A. // IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul. 2005. Vol. 12. N 5. P. 876–890. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522183
- [10] Laurent C., Teyssedre G., Montanari G.C. // IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul. 2004. Vol. 11. N 4. P. 554–560. DOI: 10.1109/TDEI.2004.1324344
- [11] Alison J.M., Champion J.V., Dodd S.J., Stevens G.C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 1693–1701.
- [12] Baudoin F., Mills D.H., Lewin P.L., Le Roy S., Teyssedre G., Lauren C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 165402. DOI: 10.1088/0022-3727/44/16/1654
- [13] Qiao B., Teyssedre G., Laurent C. // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. N 2. P. 024103. DOI: 10.1063/1.4939824
- [14] Lebey T., Laurent C.J. // Appl. Phys. 1990. Vol. 68. N 1. P. 275–282. DOI: 10.1063/1.347197

- [15] *Laurent C., Massines F., Mayoux C.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 1997. Vol. 4. N 5. P. 585–603. DOI: 10.1109/94.625646
- [16] *Teysse G., Tardieu G., Mary D., Laurent C.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2220–2229. DOI: JPhysD/34/2220
- [17] *Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Пижежецкий С.Я.* Макрорадикалы. М.: Химия, 1980. 264 с.
- [18] *Астахов Е.Ю., Клишпонт Э.Р., Милинчук В.К.* // ХВЭ. 1993. Т. 27. № 5. С. 29–34. [*Astakhov E.Y., Klinshpont E.R., Milinchuk V.K.* // Khimiya Vysokikh Ehnergij. 1993. Vol. 27. N 5. P. 29–34.]
- [19] *Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т.* // ФТТ. 2019. Т. 61. Вып. 10. С. 1964–1971. DOI: 10.21883/FTT.2019.06.47673.238 [*Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T.* // Physics Solid State. 2019. Vol. 61. N 10. P. 1964–1971. DOI: 10.1134/S1063783413070354]
- [20] *Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потапов В.К., Ходеев Ю.С.* Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродства к электрону. М.: Наука, 1974. 351 с.
- [21] *Le Roy S., Teysse G., Laurent C.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2005. Vol. 12. N 4. P. 644–654. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1511090
- [22] *Champion J.V., Dodd S.J., Stevens G.C.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. P. 604–610.
- [23] *Mary D., Albertini M., Laurent C.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. P. 171–184.
- [24] *Король Э.Н., Лобанов В.В., Назаренко В.А., Покровский В.А.* Физические основы полевой масс-спектропии. Киев: Наукова думка, 1978. 192 с.
- [25] *Zakrevskii V.A., Sudar' N.T., Zaopo A., Dubitsky Y.A.* // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. N 4. P. 2135–2139. DOI: 10.1063/1.1531820
- [26] *Johnstone R.A.W.* Mass Spectrometry for Organic Chemists. Cambridge: Cambridge University, 1972.
- [27] *Закревский В.А., Сударь Н.Т.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 66–71.