

01;05

Моделирование зависимости формы дендритов в полиэтилене от уровня приложенного напряжения

© М.М. Резинкина

*Поступило в Редакцию 2 июня 1999 г.**В окончательной редакции 14 октября 1999 г.*

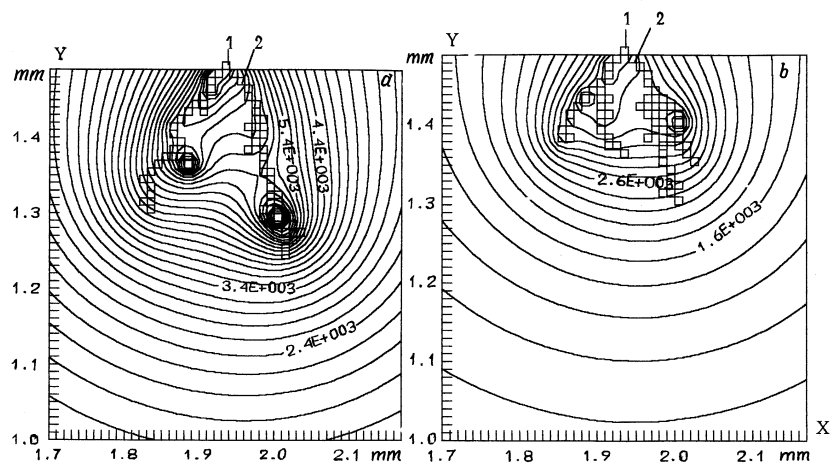
Описана методика моделирования электрофизических процессов электрического старения полимерных диэлектриков под действием напряжения. Приведен пример расчета развития дефектных структур в полиэтиленовой изоляции под действием напряжения в пространстве и времени.

Для математического моделирования электрического старения твердых диэлектриков используется теория фракталов [1]. Суть данного подхода заключается в разделении материала на диэлектрическую и проводящую фазы в зависимости от того, пробился данный микрообъем или нет. Полагается, что пробой отдельных областей носит стохастический характер, вероятность которого определяется величиной напряженности локального электрического поля. Преимуществом использования теории фракталов при описании пробоя твердых диэлектриков является учет статистического характера этого процесса. Однако в существующих фрактальных моделях, как правило, не используются экспериментальные данные о свойствах конкретных диэлектриков и процессах, присущих различным стадиям пробоя; такое описание не позволяет также рассмотреть развитие пробоя в реальном масштабе времени.

Для численного моделирования электрического старения полимерных диэлектриков во времени с учетом специфических особенностей изоляционного материала был использован подход, аналогичный описанному [2]. Рассматриваемая область изоляции разбивалась на элементарные ячейки-параллелепипеды, в пределах каждой из которых свойства среды полагались однородными. Производился расчет распределения напряженности электрического поля E . По рассчитанным уровням модуля напряженности электрического поля $|E|$ для каждой из элементарных

ячеек определялась вероятность ее пробоя. Традиционно при использовании теории фракталов для моделирования пробоя твердых диэлектриков вероятность перехода ячейки из диэлектрической в проводящую фазу полагается пропорциональной напряженности электрического поля. Для того чтобы учесть экспериментальные данные, характеризующие свойства конкретного диэлектрика, вероятность пробоя j -й ячейки определялась не непосредственно по уровню $|\mathbf{E}_j|$, а опосредованно — через случайную величину — ее время жизни t_j , которое зависит не только от $|\mathbf{E}_j|$, но и от свойств диэлектрика. Для нахождения t_j использовался генератор случайных чисел, распределение которого совпадает с экспериментально найденным распределением времен до пробоя микрообъемов исследуемого сорта диэлектрика при рассчитанном уровне напряженности электрического поля. Данный генератор запускался с помощью случайного числа K_j , фиксированного для каждой ячейки. Эти числа моделируют случайное распределение диэлектрических свойств образца изоляционного материала. Из всех прогнозируемых времен жизни элементарных ячеек выбирался минимальный, а также отличающийся от него в пределах заданной точности счета. Величина текущего шага по времени Δt_n полагалась равной этому минимальному времени: $\Delta t_n = \min\{t_n\}$ (где n — номер шага по времени). Текущий момент времени определялся путем прибавления шага к предыдущему моменту времени: $t_{n+1} = t_n + \Delta t_n$. Ячейки, время до пробоя которых определено как минимальное, полагались перешедшими из диэлектрической в фазу с большей проводимостью, что выражалось в замене соответствующих им диэлектрических проницаемостей и удельных проводимостей на другие величины. На следующем шаге по времени алгоритм повторялся.

Под действием напряжения в полимерных диэлектриках, в частности полиэтилене, происходит развитие древовидных полостей — дендритов диаметром 5–10 μm , имеющих фрактальную структуру. Пробой микроячейки означает, что она стала полой, заполненной газом. В [3] указывается, что при выдержке под напряжением ($E = 5 \text{ kV/mm}$) удельное поверхностное сопротивление стенок полости в полиэтилене за 1 h падает с $\sigma = 10^{17} \Omega$ до $10^9 \Omega$. Пробитые ячейки, стенки которых имеют $\sigma = 10^{17} \Omega$, являются непроводящими, при повышении же σ ячеек до $10^{10} \div 10^9 \Omega$ их проводимость на несколько порядков превосходит проводимость ячеек, содержащих полиэтилен. Для расчета времени, за которое происходит переход пробитой ячейки из непроводящего состояния в проводящее, использовался известный прием [4].



Распределение эквипотенциальных линий вокруг дендрита в полиэтилене в сечении $Z = \text{const}$, проходящем через иглу (1 — игла; 2 — проекция дендрита на плоскость $Z = \text{const}$, напряжения даны в вольтах): a — $U = 9 \text{ kV}$; b — $U = 6 \text{ kV}$.

Согласно изложенному там подходу, времена процессов деструкции твердых диэлектриков t_1 и t_2 , происходящие при разных напряжениях U_1 и U_2 , обратно пропорциональны величинам напряжений в степени r , зависящей от сорта диэлектрика: $t_1/t_2 = (U_2/U_1)^r$. Экспериментально полученное r для микрообъемов монолитного полиэтилена: $r = 4 \div 5$. Эта особенность полиэтилена, не учитывавшаяся в [5], должна быть принята во внимание при моделировании развития дендритов.

В качестве исходных данных при моделировании использовались результаты экспериментов по временам до пробоя микрообъемов монолитного полиэтилена, полученные на экспериментальном стенде, описанном в [6]. Расчет напряженности трехмерного электрического поля производился методом конечных разностей аналогично [7].

На рисунке для сечения $Z = \text{const}$ представлены рассчитанные распределения линий равного потенциала в окрестности дендритов, развивающихся в полиэтилене в системе "игла-плоскость", полученные в результате математического моделирования с помощью описанного подхода. Выбор данной электродной системы обусловлен большим нако-

плненным экспериментальным материалом по электрическому старению в ней полиэтиленовой изоляции. Расстояние между иглой и плоскостью 1.5 mm, к игле прикладывалось напряжение $U = 9 \text{ kV}$ (время развития дендрита 1 min, рисунок, *a*) и $U = 6 \text{ kV}$ (время развития дендрита 10 min, рисунок, *b*). Причем распределение диэлектрических свойств образца полиэтилена, выразившееся в задании случайных чисел K_j ячеек, в этих численных экспериментах было одним и тем же. Этим объясняется некоторая схожесть данных дендритов, отличия же их пространственной структуры определяются только качественными изменениями при приложении больших или меньших напряжений.

Экспериментальные исследования показывают, что при выдержке образца полиэтилена под напряжением 6 kV удлинение дендрита происходит медленно. Данный процесс характеризуется также утолщением ветвей дендрита и увеличением его фрактальной размерности ($D \sim 1.4-1.5$) — дендрит становится гуще. При приложении же к образцу $U = 9 \text{ kV}$ рост дендрита происходит быстро, и за единицы-десятки минут он перекрывает разрядный промежуток. При этом ветви дендрита остаются тонкими на концах, невысока и его фрактальная размерность ($D \sim 1.1-1.2$), он представляет собой слабо разветвленную структуру. Предложенный подход позволил смоделировать данные явления.

В том случае, если не учитывается процесс увеличения проводимости стенок дендрита при моделировании его роста при разных напряжениях, фрактальная размерность дендритов остается неизменной, отличаются только времена их развития. Для моделирования изменения объемной структуры дендрита при больших или меньших напряжениях необходимо учитывать экспериментально установленную зависимость величины проводимости стенок каналов дендрита от длительности и уровня приложенного напряжения. При больших напряжениях ($U = 9 \text{ kV}$) переход вновь пробитых ячеек в состояние с высокой поверхностной проводимостью происходит достаточно быстро — до того, как пробьется следующая ячейка. Поэтому весь дендрит можно считать проводящим, а значит максимальная напряженность электрического поля достигается на концах его ветвей, растущих в основном в длину (рисунок, *a*). При меньших же напряжениях ($U = 6 \text{ kV}$) из-за задержки уменьшения поверхностного сопротивления вновь пробитых ячеек на несколько шагов по времени уже не весь дендрит является проводящим и максимальная напряженность электрического поля может достигаться как на концах его ветвей, так и в других зонах. Это обуславливает

не только рост дендрита в глубь промежутка, но и развитие побегов в средней части ветвей (рисунок, *b*). Таким образом, ветви дендрита утолщаются, вследствие этого напряженность электрического поля падает и рост дендрита в длину замедляется. Сравнения времен развития и фрактальной структуры смоделированных таким образом дендритов с результатами экспериментов показало их хорошее совпадение.

Список литературы

- [1] *Фракталы в физике* / Под ред. Пьетронеро, Э. Тозатти. М.: Мир, 1988. 670 с.
- [2] Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 2. С. 198–201.
- [3] Morshuis P. // 9th International Symposium on High Voltage Engineering. Aug. 28–Sept. 1. 1995. Graz. V. 5. P. 5644.
- [4] Starr W., Endicott H. // IEEE Trans. PAS 55. 1961. N 8.
- [5] Rezinkina M.M. // 10th International Symposium on High Voltage Engineering. Aug. 25–29, 1997. Montreal, Canada. V. 2. P. 383–386.
- [6] Конотоп В.В., Резинкин О.Л., Резинкина М.М. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 4. С. 191–196.
- [7] Резинкина М.М., Резинкин О.Л. // Электричество. 1995. № 7. С. 62–66.