

04;05;12

Моделирование роста дендритов и частичных разрядов в эпоксидной смоле

© М.Д. Носков,¹ А.С. Малиновский,¹ М. Закк,² А.Й. Шваб²

¹Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: noskov@hvd.tpu.ru

²Университет,
D-76128 Карлсруэ, Германия
e-mail: sack@ieh.etec.uni-karlsruhe.de

(Поступило в Редакцию 26 октября 2000 г. В окончательной редакции 13 марта 2001 г.)

Представлена самосогласованная модель роста дендритов и частичных разрядов в твердом диэлектрике при переменном напряжении. Рост дендритов определяется локальной напряженностью электрического поля и разрушением диэлектрика под действием частичных разрядов. Численная реализация модели использована для количественного описания пространственно-временной динамики роста дендритов и характеристик частичных разрядов в эпоксидной смоле при геометрии электродов острие–плоскость. Проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными путем электрических измерений частичных разрядов и оптической регистрации роста дендритов при тех же условиях.

Введение

Пробой полимерной изоляции при длительном воздействии переменного напряжения происходит в результате роста древовидных структур (дендритов), состоящих из наполненных газом каналов [1,2]. Дендриты начинают расти в местах с повышенной локальной напряженностью поля (выступы на поверхности электрода, проводящие включения, микротрещины, полости и т.д.). Пробой изоляции происходит вскоре после перекрытия межэлектродного промежутка дендритом. Рост дендритов является следствием разрушения диэлектрика под действием частичных разрядов, происходящих в каналах дендрита. Таким образом, рост дендритов и частичные разряды являются взаимосвязанными процессами, приводящими к пробое изоляции. Динамика роста дендритов и параметры частичных разрядов зависят от физико-химических свойств диэлектрика, частоты и величины прикладываемого напряжения, геометрии электродов и т.д.

Изучение роста дендритов стало особенно актуальным в последнее время в связи с использованием кабелей с полимерной изоляцией при напряжениях до 400–500 kV. С помощью электронно-оптических и электронных измерительных установок были определены параметры частичных разрядов и пространственно-временные характеристики роста дендритов [3–6]. Однако, несмотря на интенсивные исследования, количественная теория, описывающая рост дендритов под действием частичных разрядов, до сих пор не создана. Это обусловлено как большим числом взаимосвязанных физико-химических процессов, приводящих к разрушению диэлектрика, так и сложным стохастическим характером роста дендритов. В последние годы были предложены различные математические модели, позволяющие описать стохастически

ветвящийся рост дендритов, например [7–13]. Наиболее интересные результаты были получены на основе модели пробоя диэлектриков [7–11] и модели разрядных лавин [12,13]. В модели пробоя диэлектриков рост каналов определяется напряженностью электрического поля. Вероятность роста принимается пропорциональной степени локальной напряженности поля. Распределение электрического поля рассчитывается на основе уравнения Лапласа. Потенциал дендрита принимается равным потенциалу электрода или задается падение напряжения вдоль каналов. С помощью различных модификаций модели пробоя диэлектриков было смоделировано формирование различных типов дендритов (в виде дерева или куста) [8,10], влияние барьеров и включений с различной диэлектрической проницаемостью [10], проводимостью [11] и прочностью [9] на рост каналов. В модели разрядных лавин [12,13] рассматривается накопление разрушений в материале диэлектрика под действием электронных лавин. Рост каналов описывается с помощью случайных флуктуаций локального электрического поля. Задавая различные диапазоны флуктуаций, в рамках этой модели также удалось описать рост разных типов дендритов.

К недостаткам перечисленных моделей роста дендритов следует отнести то, что они не рассматривают частичные разряды в каналах дендрита и, следовательно, не описывают реальную динамику распределения зарядов и полей в диэлектрике. Вместе с тем существующие модели частичных разрядов, например [14,15], не рассматривают процесс роста дендрита и не могут быть использованы для количественного описания пробоя изоляции. Поэтому представляется актуальным создание комплексной модели, описывающей как рост дендритов под действием частичных разрядов, так и частичные разряды в существующих каналах. Подобная модель была

предложена в работе [16]. С помощью данной модели удалось качественно воспроизвести основные закономерности роста дендритов и характеристики частичных разрядов [17]. В настоящей работе модель развивается и используется для количественного описания динамики роста дендритов и частичных разрядов в эпоксидной смоле при геометрии электродов острие–плоскость на переменном напряжении. Результаты моделирования сопоставляются с экспериментальными данными.

Самосогласованная модель роста дендритов и частичных разрядов

1. Основные положения модели. Самосогласованная модель описывает рост дендрита как формирование структуры ветвящихся каналов в трехмерном пространстве. Образование нового канала определяется разрушением диэлектрика, окружающего существующие каналы, и локальной напряженностью электрического поля. Разрушение диэлектрика происходит вследствие частичных разрядов в каналах. Предполагается, что степень разрушения пропорциональна количеству энергии, выделившейся в каналах при частичных разрядах. Рост каналов происходит, если величина локального разрушения (т.е. энергия, выделившаяся на единицу длины канала) достигла критического значения W_c и напряженность электрического поля у поврежденного канала превышает критическую напряженность E_c . Направление роста нового канала стохастически зависит от локальной напряженности электрического поля: вероятность роста в направлении \mathbf{n} пропорциональна квадрату проекции E_n локальной напряженности на это направление, если E_n больше E_c , и равна нулю в противном случае. Использование случайного закона для выбора направления роста отражает неоднородность диэлектрического материала и стохастичность реального процесса образования нового канала. Введение критической напряженности E_c связано с существованием пороговой напряженности для формирования нового канала даже в том случае, когда диэлектрик поврежден. Использование квадратичной зависимости вероятности роста от напряженности поля связывает рост каналов с плотностью энергии электрического поля.

Инициирование частичного разряда в канале дендрита происходит, когда локальная напряженность электрического поля вдоль сегмента канала превышает пороговую напряженность зажигания E_i . Разряд прекращается, когда локальная напряженность поля вдоль канала падает ниже напряженности гашения E_r . Электрическое поле определяется как величиной потенциала электродов, так и зарядами, распределенными вдоль каналов дендрита. В отсутствие частичных разрядов каналы являются непроводящими. Перенос заряда происходит только во время частичных разрядов. Так как длительность частичного разряда (10–100 ns) значительно меньше характеристического времени роста дендрита ($> 10^3$ s),

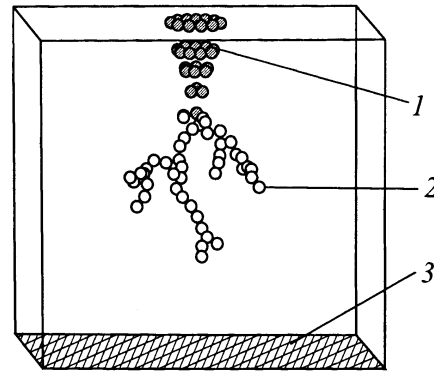


Рис. 1. Область моделирования: 1 — острие, 2 — дендрит, 3 — плоский электрод.

то в модели предполагается, что частичные разряды происходят мгновенно [1].

2. Численная реализация модели. На основе предложенного подхода создана трехмерная численная реализация модели, позволяющая проводить компьютерное моделирование роста дендритов и частичных разрядов в диэлектрике. Система электродов состоит из острия, к которому приложено переменное напряжение, и заземленной плоскости. Электрическое поле рассчитывается с помощью зарядового метода [18], основанного на законе Кулона и принципе суперпозиции полей, создаваемых отдельными точечными зарядами. Распределение поля, соответствующее рассматриваемой геометрии электродов, достигается размещением достаточно большого числа точечных зарядов на поверхности конуса, представляющего острие. Влияние заземленного плоского электрода на распределение электрического поля учитывается с помощью метода зеркальных отображений. Величина каждого заряда, расположенного на острие, вычисляется с помощью итерационной процедуры таким образом, чтобы получить заданное изменение прикладываемого напряжения $\varphi(t)$ со временем. Каналы дендрита описываются ветвящимися цепочками точечных зарядов, расположенных на фиксированном расстоянии d друг от друга. Таким образом, дендрит может быть представлен связанной структурой соприкасающихся сфер (рис. 1). Радиус сфер $r = d/2$ определяет минимальный пространственный масштаб моделирования и является важным параметром численной модели.

Для описания временной динамики роста дендрита и частичных разрядов в модели используются дискретные временные шаги Δt равной величины. Интервал Δt должен быть достаточно мал, чтобы имело место разрешение отдельных частичных разрядов. На каждом временном шаге n , соответствующем моменту времени $t_n = n\Delta t$, состояние каждой сферы характеризуется удельной энергией повреждения W_i^n и электрическим зарядом q_i^n (i — номер сферы). Потенциал φ_i^n i -й сферы

рассчитывается как сумма потенциала заряда q_i^n и всех остальных зарядов (включая и мнимые)

$$\varphi_i^n = \frac{q_i^n}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} + \sum_{j \neq i} \frac{q_j^n}{4\pi\epsilon\epsilon_0 |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} - \sum_j \frac{q_j^n}{4\pi\epsilon\epsilon_0 |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j^*|}, \quad (1)$$

где ϵ и ϵ_0 — относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости, \mathbf{r}_j и \mathbf{r}_j^* — координаты реального заряда q_j и соответствующего ему зеркально отраженного заряда.

На каждом временном шаге выполняются следующие операции: 1) изменение мгновенного значения прикладываемого к острию напряжения и пересчет зарядов острия; 2) моделирование частичных разрядов и изменение распределений удельной энергии повреждения и зарядов сфер, участвующих в частичных разрядах; 3) моделирование роста дендритов путем присоединения новых сфер к существующей структуре или острию.

Расчет зарядов острия происходит следующим образом. Потенциалы всех точек острия принимаются равными мгновенному значению прикладываемого напряжения $\varphi_i^n = \varphi(n\Delta t)$. Заряды дендрита при этом считаются постоянными. Для каждой точки острия записывается уравнение (1). Полученная система линейных уравнений решается относительно неизвестных зарядов острия методом Гаусса.

На временном шаге моделируется не более одного частичного разряда. При этом каналы дендрита разбиваются на сегменты, образуемые парами, состоящими из соседних сфер. Каждый сегмент может находиться в одном из двух возможных состояний: проводящем или непроводящем. Проводящее состояние соответствует наличию разряда между сферами, непроводящее — отсутствию разряда. Моделирование частичного разряда включает в себя согласованный расчет динамики состояний сегментов, зарядов и потенциалов сфер. В начале итерационной процедуры (номер итерации $k = 0$) все сегменты находятся в непроводящем состоянии, заряды и удельные энергии повреждения всех сфер равны величинам, полученным на предыдущем временном шаге $n - 1$: $q_i^n(0) = q_i^{n-1}$, $W_i^n(0) = W_i^{n-1}$. Переход от шага $k - 1$ к шагу k осуществляется следующим образом. Сначала изменяются, если это необходимо, состояния сегментов. Сегмент переходит в проводящее состояние или остается в проводящем состоянии, если абсолютное значение разности потенциалов $\Delta\varphi_{i,j}^n(k-1) = \varphi_i^n(k-1) - \varphi_j^n(k-1)$ между соседними сферами i и j превышает напряжение зажигания частичного разряда $\varphi_r = E_r d$,

$$|\Delta\varphi_{i,j}^n(k-1)| > \varphi_r. \quad (2)$$

Сегмент переходит в непроводящее состояние (остается в непроводящем состоянии), если разность потен-

циалов ниже напряжения гашения частичного разряда $\varphi_r = E_r d$,

$$|\Delta\varphi_{i,j}^n(k-1)| < \varphi_r. \quad (3)$$

Затем осуществляется перенос заряда по сегментам, находящимся в проводящем состоянии. Величина перемещаемого заряда $\Delta q_{i,j}^n(k)$ пропорциональна разности потенциалов между сферами $\Delta\varphi_{i,j}^n(k-1)$

$$\Delta q_{i,j}^n(k) = \lambda \Delta\varphi_{i,j}^n(k-1), \quad (4)$$

где λ — численный параметр итерации.

Значение параметра λ выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальную скорость вычислений при условии устойчивости итерационной процедуры. В настоящей работе для моделирования используется $\lambda = 0.3 \cdot 4\pi\epsilon\epsilon_0 r$. Перенос зарядов приводит к изменению зарядов сфер, принадлежащих по крайней мере одному проводящему сегменту. Новые заряды рассчитываются по формуле

$$q_i^n(k) = q_i^n(k-1) - \sum_j \Delta q_{i,j}^n(k), \quad (5)$$

где суммирование производится по всем точкам j , связанным с точкой i проводящими сегментами. После перемещения всех зарядов производится перерасчет всех зарядов острия так, чтобы потенциал острия оставался равен потенциалу $\varphi(n\Delta t)$, соответствующему данному временному шагу. В соответствии с новым распределением зарядов острия и дендрита по формуле (1) рассчитываются новые потенциалы точек дендрита $\varphi_i^n(k)$. На каждом шаге итерации происходит увеличение энергий повреждения сфер, принадлежащих проводящим сегментам. Только часть энергии, выделяющейся в каналах при частичных разрядах, расходуется на разрушение материала диэлектрика. Для простоты данный факт учитывается соответствующим увеличением значения критической энергии повреждения W_c , т.е. под W_c понимается удельная энергия, которая должна выделиться при частичных разрядах (на единицу длины канала), чтобы стало возможным формирование нового канала. Приращение удельной энергии повреждения равняется энергии, выделяющейся при перемещении заряда между сферой i и предшествующей ей по структуре дендрита сферой j , деленной на длину сегмента d . Таким образом, после k -го шага итерации энергия повреждения $W_i^n(k)$ будет равна

$$W_i^n(k) = W_i^n(k-1) + \Delta q_{i,j}^n(k) \Delta\varphi_{i,j}^n(k-1) / d. \quad (6)$$

Итерационная процедура повторяется до тех пор, пока не останется ни одного сегмента в проводящем состоянии. Заряды q_i^n и удельные энергии повреждения W_i^n точек дендрита после временного шага n определяются последним шагом итерации k_l

$$q_i^n = q_i^n(k_l), \quad W_i^n = W_i^n(k_l). \quad (7)$$

Траектория частичного разряда состоит из всех сегментов, которые по крайней мере один раз были в проводящем состоянии в процессе итераций. Величина частичного разряда Q^n рассчитывается как суммарное изменение всех зарядов острия и дендрита

$$Q^n = \sum_i (q_i^n - q_i^{n-1}). \quad (8)$$

Рост дендрита моделируется путем добавления новых сфер к уже существующей структуре или острию. Новая сфера может присоединиться к любой из сфер дендрита, удельная энергия повреждения W_i^n которой достигла критического значения W_c

$$W_i^n \geq W_c. \quad (9)$$

Если условие (9) выполняется, то для данной сферы строится ансамбль возможных положений новых сфер. Число положений должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить реализацию используемого в модели вероятностного закона роста. В данной работе при расчетах строились ансамбли из десяти положений. Возможные положения равномерно распределяются вокруг рассматриваемой сферы таким образом, чтобы новые сферы не пересекали существующие. Положение новой сферы выбирается случайно с вероятностью P , пропорциональной квадрату разности потенциалов $\Delta\varphi$ между рассматриваемой точкой и предполагаемым положением, если абсолютная величина $\Delta\varphi$ превосходит критическое значение $|\Delta\varphi| > E_c d$ (в случае $|\Delta\varphi| \leq E_c d$ вероятность равна нулю),

$$P = \begin{cases} \Delta\varphi^2/Z, & |\Delta\varphi| > E_c d, \\ 0, & |\Delta\varphi| \leq E_c d, \end{cases} \quad (10)$$

где Z — нормировочный множитель, определяемый как $Z = \sum (\Delta\varphi)^2$ (суммирование выполняется по всем возможным положениям, для которых $|\Delta\varphi| > E_c d$).

Если произошел рост, то величина W_c вычитается из удельной энергии повреждения сферы, к которой была присоединена новая. Удельная энергия повреждения W_j^n и заряд q_j^n новой сферы j полагаются равными нулю. По завершении моделирования роста происходит переход к следующему временному шагу. Моделирование продолжается до тех пор, пока дендрит не достигнет плоского электрода. На начальной стадии, когда дендрит еще не существует, новая сфера может присоединиться только к острию. Так как в работе не рассматривается процесс инициирования дендрита, то острию изначально присваивается энергия повреждения, превосходящая W_c , чтобы сделать возможным рост.

П а р а м е т р ы м о д е л и. Модель включает в себя пять основных параметров W_c, E_c, E_i, E_r, r , которые вместе с геометрией электродов и параметрами прикладываемого напряжения определяют характеристики роста дендритов и частичных разрядов. Параметры модели имеют достаточно простую физическую интерпретацию. Критическая энергия повреждения W_c определяется

энергией, которая должна быть затрачена на разрушение диэлектрика для образования канала единичной длины. Критическая напряженность E_c связана с формированием канала в подвергнутому действию частичных разрядов диэлектрике. Величина E_c может быть намного меньше напряженности, необходимой для пробоя неповрежденного диэлектрика. Величины критической энергии повреждения W_c и напряженности E_c зависят от физико-химических свойств диэлектрика и размеров каналов. Пороговые напряженности E_i и E_r определяют условия зажигания и гашения газового разряда в каналах дендрита. Исследования разряда в тонких каналах показывают, что значения пороговых напряженностей увеличиваются при уменьшении диаметра канала и могут значительно превосходить соответствующие значения, характерные для разряда в свободном пространстве. Кроме этого, пороговые поля E_i и E_r зависят от состава газа и давления внутри каналов. Радиус расчетных сфер r определяет не только минимальный пространственный масштаб моделирования, но и связь между зарядом сферы и потенциалом (первое слагаемое в правой части формулы (1)). Таким образом, параметр r связан с размером области распределения объемного заряда вокруг каналов дендрита. Размеры области инжектированного в диэлектрик заряда зависят от напряженности поля и могут превышать оптически регистрируемый диаметр каналов.

Величины параметров модели могут быть определены путем анализа физических процессов, сопровождающих рост дендритов, или на основе сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных. В настоящей модели параметры были определены путем сопоставления результатов тестовых расчетов и данных экспериментальных исследований роста дендритов в эпоксидной смоле. Моделирование проводилось при следующих параметрах: $W_c = 0.07 \text{ J/m}$, $E_c = 1.0 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, $E_i = 8 \cdot 10^7 \text{ V/m}$, $E_r = 1.5 \cdot 10^7 \text{ V/m}$, $r = 10 \mu\text{m}$. Характеристики напряжения и геометрия электродов совпадали с использованными в экспериментах.

Материал и методика эксперимента

Эксперименты проводились с эпоксидной смолой марки Araldit CY221 (отвердитель HY2966) производства Ciba Specialty Chemicals Inc. Стальная игла с радиусом острия $10 \mu\text{m}$ вставлялась в прямоугольную форму перед приготовлением образца. В ходе экспериментов образец помещался на плоский заземленный электрод внутри прозрачного сосуда, заполненного трансформаторным маслом для изоляции. Расстояние между острием иглы и плоскостью составляло 1.5 mm . Синусоидальное напряжение с действующим значением 8 kV и частотой 50 Hz прикладывалось к острию.

Управляемая персональным компьютером экспериментальная установка состояла из системы измерения частичных разрядов, видеокамеры для теневой съемки

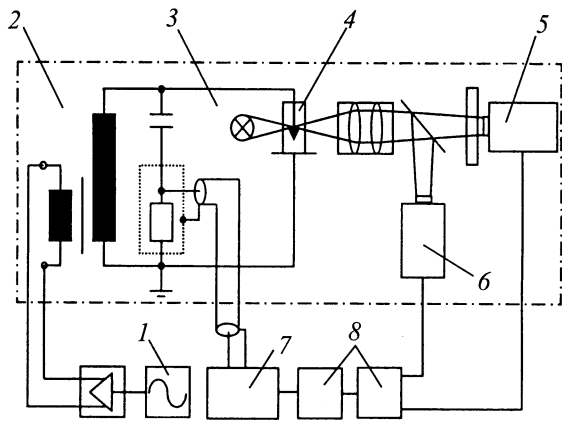


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — источник переменного напряжения, 2 — повышающий трансформатор, 3 — лампа подсветки, 4 — рабочая камера, 5 — фотоумножитель, 6 — видеокамера теневой съемки, 7 — система измерения частичных разрядов, 8 — управляющие компьютеры.

дендритов и фотоумножителя для регистрации светового излучения частичных разрядов. Схема установки показана на рис. 2.

Результаты и обсуждение

Формирование дендрита начинается с образования одного или нескольких каналов на кончике острия. Рост каналов сопровождается стохастическим ветвлением и изгибами. Типичные структуры дендритов, полученные при моделировании и в экспериментах, приведены на рис. 3 для четырех последовательных моментов времени t после начала роста. Структуры данного типа часто называют древовидными [1]. Увеличение величины прикладываемого напряжения приводит к росту числа ветвей и формированию кустообразных структур. Форма дендрита может быть количественно описана с помощью фрактальной размерности [19]. В настоящей работе для оценки фрактальной размерности используется метод покрытия. Проекция дендрита покрывается квадратами со стороной l . Затем подсчитывается число квадратов $N(l)$, которые содержат фрагменты дендрита. Для фрактальной структуры с размерностью D имеет место степенная зависимость между числом квадратов $N(l)$ и их размером l

$$N(l) \propto l^{-D}. \quad (11)$$

Таким образом, в логарифмических координатах фрактальная размерность может быть найдена по наклону прямой, аппроксимирующей зависимость $\ln N(l)$ от $\ln l$. Рассчитанные данным методом фрактальные размерности дендритов, полученных в экспериментах и при моделировании, находятся в пределах от 1.45 до 1.55. Близкие по величине значения фрактальных размерностей древовидных структур были получены в работах [20,21]. Скорость роста дендрита уменьшается со временем как

при моделировании, так и в эксперименте. На рис. 4 приведены временные зависимости длины дендрита R (расстояние от острия до максимально удаленной точки дендрита). Замедляющийся характер роста дендрита на начальной стадии также отмечался во многих исследованиях, например [1,3–5].

Рост дендрита сопровождается частичными разрядами в его каналах. Моделирование показывает, что частичные разряды начинаются вблизи острия и распространяются к концам каналов. Различные комбинации каналов дендрита составляют траектории разных частичных разря-

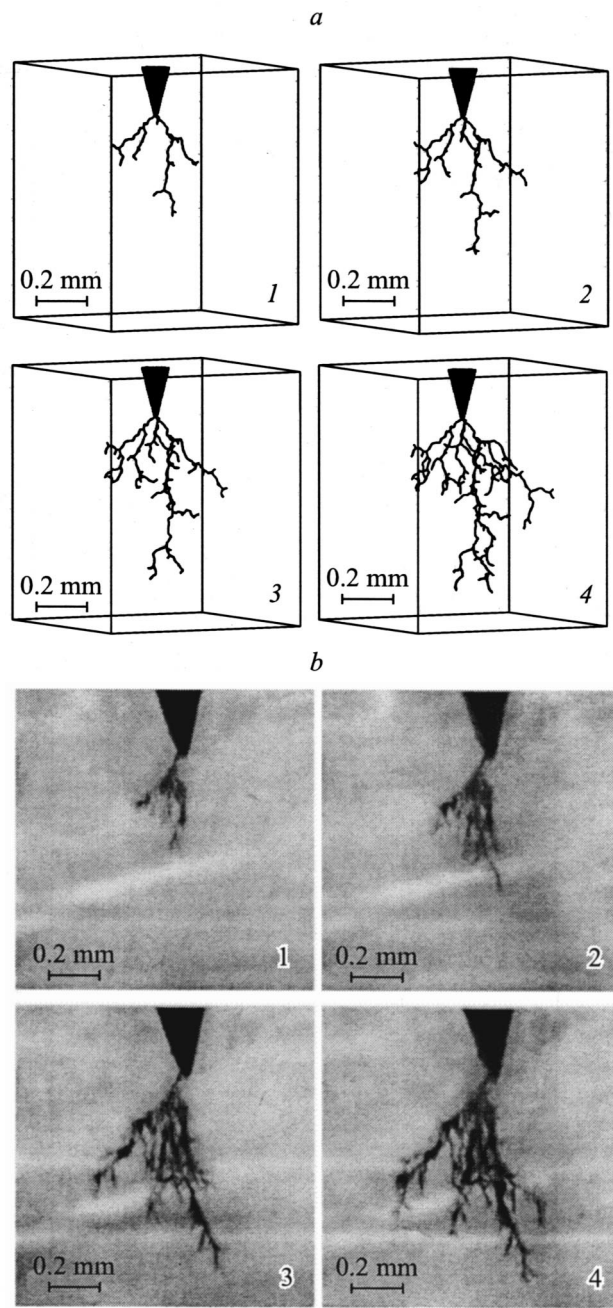


Рис. 3. Рост дендрита: а — моделирование, б — эксперимент. t , min: 1 — 2, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 9.

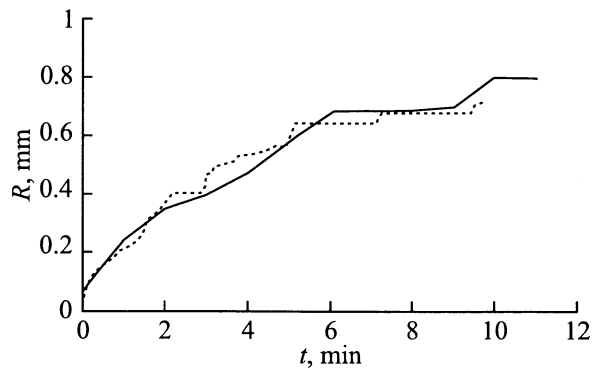


Рис. 4. Зависимость длины дендрита от времени роста. Сплошная кривая — эксперимент, штриховая — моделирование.

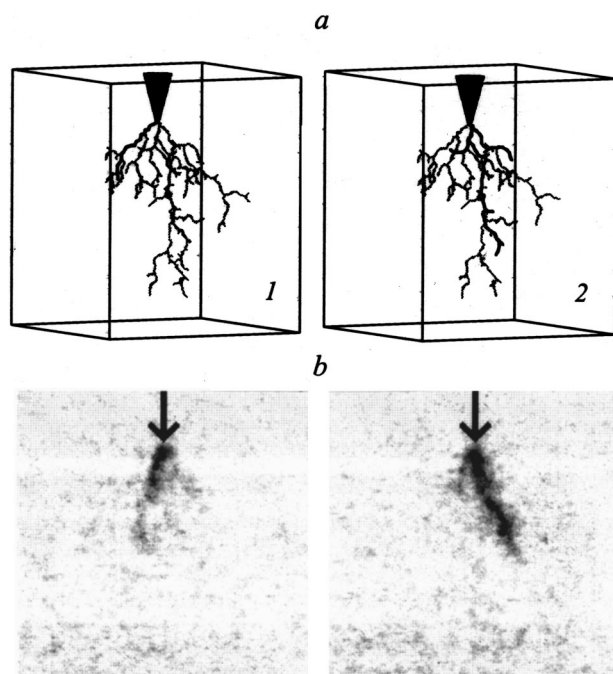


Рис. 5. Траектории частичных разрядов (а) и инвертированные картины излучения каналов дендрита (б). Траектории разрядов изображены черными линиями, а каналы дендрита — серыми. Величины частичных разрядов: 1 — 44, 2 — 181 pC. Стрелка показывает положение острия электрода.

дов. Это можно объяснить переносом заряда и ослаблением поля вдоль каналов, принявших участие в частичном разряде. Таким образом, следующие частичные разряды происходят вдоль других каналов. Типичные траектории частичных разрядов, полученные при моделировании, показаны жирными линиями на рис. 5, а. Реальные частичные разряды в каналах дендрита сопровождаются излучением света. Картины излучения, полученные с помощью электронно-оптического преобразователя, показывают, что в различные моменты времени излучение исходит от различных каналов дендрита (рис. 5, б). Данное наблюдение можно рассматривать как подтвержде-

ние того, что действительно разные комбинации каналов участвуют в различных частичных разрядах.

Анализ результатов моделирования показывает, что величина Q частичного разряда пропорциональна суммарной длине S всех каналов, принимавших участие в данном разряде. Одной и той же длине траектории L (расстоянию между острием и наиболее удаленной точкой траектории) могут соответствовать различные величины S вследствие разного числа каналов, участвующих в частичном разряде. Поэтому длина траектории определяет только максимальную величину разрядов. Установленная при моделировании связь между полной длиной траектории S и величиной частичных разрядов подтверждается данными экспериментального исследования корреляции величины разряда и суммарной длины светящихся каналов [6]. В процессе роста дендрита максимально возможная длина траектории частичного разряда увеличивается и соответственно растет максимальная величина наблюдаемых разрядов. На рис. 6 показаны зависимости от времени максимальных величин Q_{\max} частичных разрядов, полученные в экспериментах и при моделировании.

Для одной и той же длины дендрита величины частичных разрядов зависят от фазы прикладываемого напряжения. Максимальная величина разрядов увеличивается с ростом мгновенного значения прикладываемого напряжения. Полярность разрядов совпадает со знаком временной производной напряжения. Корреляция между величиной частичных разрядов и фазой ($\varphi-q-n$ -диаграмма) показана на рис. 7. Подобного вида $\varphi-q-n$ -диаграммы, часто называемые "крылоподобными", регистрировались при росте дендритов на переменном напряжении в других исследованиях, например [5]. Частота следования разрядов увеличивается с ростом абсолютной величины производной напряжения по времени и достигает максимума вблизи фазовых углов 0 и 180° . Гистограммы, показывающие полученные при моделировании и в экспериментах распределения числа частичных разрядов по фазе, приведены на рис. 8.

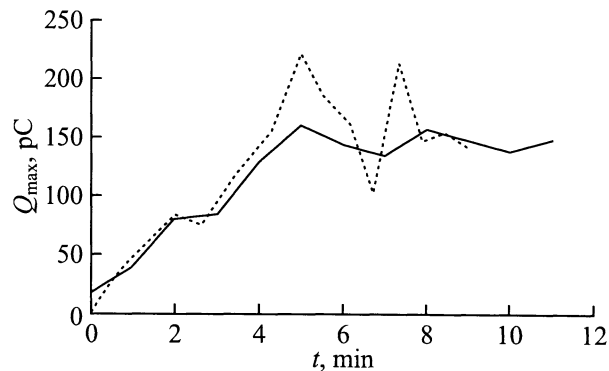


Рис. 6. Зависимость от времени максимальной величины частичных разрядов. Сплошная кривая — эксперимент, штриховая — моделирование.

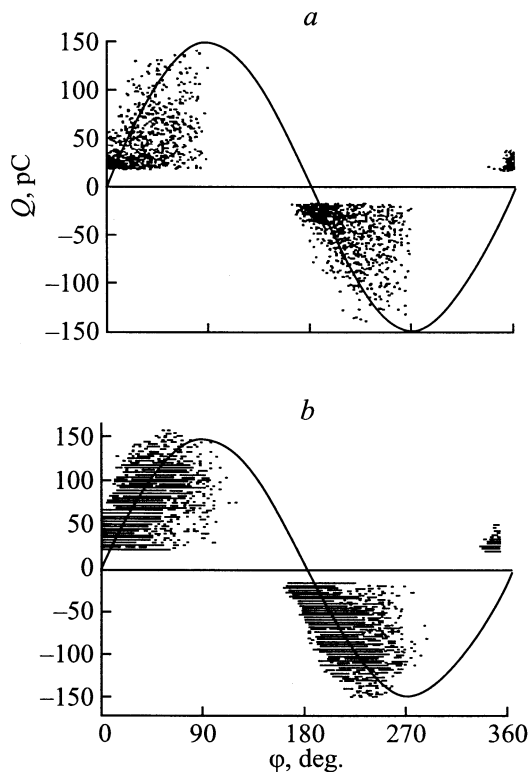


Рис. 7. Корреляция между величиной частичных разрядов и фазой приложенного напряжения ($t = 9 \text{ min}$). *a* — моделирование, *b* — эксперимент.

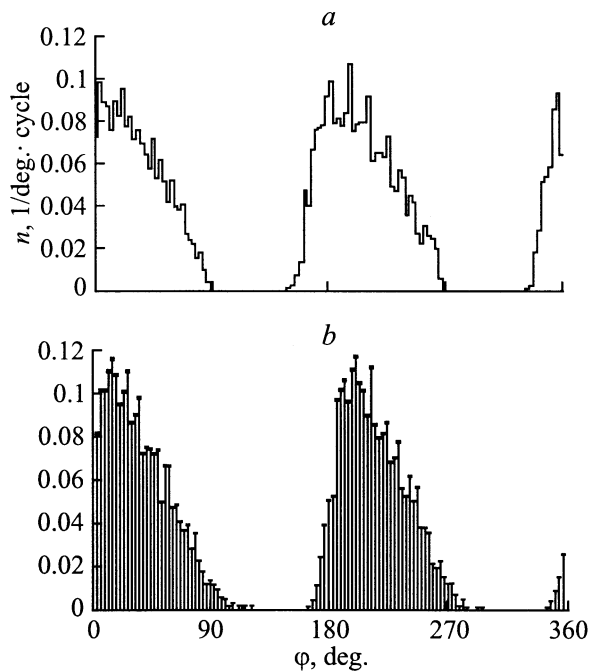


Рис. 8. Зависимость плотности распределения частичных разрядов n от фазы приложенного напряжения ($t = 9 \text{ min}$). *a* — моделирование, *b* — эксперимент.

Полученные в экспериментах и при моделировании закономерности поведения частичных разрядов можно объяснить на основе пороговой зависимости зажигания

и гашения разрядов от напряженности поля. Разряд начинается, если напряженность поля вдоль каналов превышает критическое значение E_i и заканчивается, когда вследствие перемещения зарядов напряженность падает ниже остаточной величины E_r . Таким образом, после завершения разряда падение напряжения на единицу длины канала приблизительно равно E_r . Поэтому максимальная длина траектории разряда, а следовательно, и максимально возможная величина частичных разрядов увеличиваются с ростом величины приложенного напряжения. Данное объяснение подтверждается экспериментальными данными. В работе [15] регистрировалось излучение каналов дендрита в различных интервалах фазы прикладываемого напряжения и было установлено, что длина излучающей части дендрита увеличивается с ростом абсолютной величины напряжения.

Полученные результаты качественно согласуются с данными экспериментальных исследований роста дендритов и частичных разрядов при подобных условиях в эпоксидной смоле и других полимерных материалах, например, опубликованных в работах [3–5]. Следовательно, предложенная модель адекватно описывает общие закономерности роста дендритов под действием частичных разрядов, основные положения модели отражают реальные физические процессы. Количественное соответствие результатов моделирования и данных, полученных в экспериментах с эпоксидной смолой, также свидетельствуют в пользу правильности разрабатываемого подхода. Следует также отметить, что модель является достаточно общей и может быть использована для описания роста дендритов и частичных разрядов в других полимерных материалах, например полиэтилене, полиметилметакрилате и т.д. Таким образом, предложенная модель может служить основой для создания методики расчета электрической прочности полимерной изоляции в зависимости от геометрии электродов, параметров напряжения и свойств диэлектрика. Другим возможным применением результатов работы является диагностика состояния изоляции с помощью анализа параметров частичных разрядов.

Дальнейшее развитие модели может быть сделано путем введения проводимости стенок каналов и диэлектрика, зависимости критических напряженностей зажигания и гашения разрядов от давления и радиуса каналов и т.д. Это может позволить более точно описать рост дендритов и исследовать такие экспериментально наблюдаемые эффекты, как переход от древовидного роста дендритов к кустообразному при увеличении напряжения, временное прекращение и возобновление роста дендритов и частичных разрядов и т.д.

Заключение

Разработана самосогласованная модель роста дендритов и частичных разрядов в полимерной изоляции. Модель основана на энергетическом подходе и поро-

говой зависимости роста каналов, а также зажигания и гашения разрядов в каналах дендрита от локальной напряженности поля. Создана нерешеточная трехмерная численная реализация модели, позволяющая с помощью вычислительных экспериментов изучать рост дендритов и частичных разрядов при геометрии острие–плоскость на переменном напряжении.

Проведено исследование связи параметров частичных разрядов с ростом дендрита в эпоксидной смоле. Результаты моделирования показывают, что величина частичного разряда пропорциональна суммарной длине каналов, принявших участие в данном разряде. Максимальная величина частичных разрядов возрастает с увеличением длины дендрита. Анализ фазовых диаграмм показывает, что в пределах одного периода максимальная величина частичных разрядов увеличивается с ростом мгновенного значения напряжения, а частота разрядов — с увеличением скорости изменения напряжения. Количественное соответствие между результатами моделирования и экспериментальными данными подтверждает адекватность модели и достоверность полученных результатов.

Работа была поддержана Немецким научно-исследовательским обществом (DFG) и Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ).

Список литературы

- [1] *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. London: Peregrinus, 1992.
- [2] *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979.
- [3] *Champion J.V., Dodd S.J.* // J. Phys. D. 1996. Vol. 29. P. 862–868.
- [4] *Champion J.V., Dodd S.J., Alison J.M.* // J. Phys. D. 1996. Vol. 29. P. 2689–2695.
- [5] *Suwarno, Suzuoki Y., Komori F.* et al. // J. Phys. D. 1996. Vol. 29. P. 2922–2931.
- [6] *Ehara Y., Naoe M., Urano K.* et al. // IEEE Trans. Dielectrics EI. 1998. Vol. 5. P. 728–733.
- [7] *Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J.* // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 1033–1036.
- [8] *Wiesmann H.J., Zeller H.R.* // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. P. 1770–1773.
- [9] *Sweeney P.J., Dissado L.A., Cooper J.M.* // J. Phys. D. 1992. Vol. 25. P. 113–119.
- [10] *Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 63–75.
- [11] *Карпов Д.И., Лопатин В.В., Носков М.Д.* // Электричество. 1995. № 7. С. 59–61.
- [12] *Dissado L.A., Sweeney P.J.* // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. P. 16 261–16 268.
- [13] *Fothergill J.C., Dissado L.A., Sweeney P.J.* // IEEE Trans. Dielectrics EI. 1994. Vol. 1. P. 474–486.
- [14] *Champion J.V., Dodd S.J.* // J. Phys. D. 1998. Vol. 31. P. 2305–2314.
- [15] *Wu K., Suzuoki Y., Muzutani T.* et al. // J. Phys. D. 2000. Vol. 33. P. 1197–1201.

- [16] *Malinovski A.S., Noskov M.D., Sack M.* et al. // Proc. of 6th Intern. Conf. on Cond. and Breakdown in Solid Dielect. 1998. P. 305–308.
- [17] *Noskov M.D., Malinovski A.S., Sack M.* et al. // IEEE Trans. Dielectrics EI. 2000. Vol. 7. P. 725–733.
- [18] *Singer H., Steinbigler H., Weiss P.* // IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. 1974. Vol. 93. P. 1660–1668.
- [19] *Kudo K.* // IEEE Trans. Dielectrics EI. 1998. Vol. 5. P. 713–727.
- [20] *Kobayashi S., Maruyama S., Kawai H.* et al. // Proc. of 4th Intern. Conf. on Properties and Applications of Dielect. Materials. 1994. P. 359–362.
- [21] *Uehara H., Kudo K.* // Proc. of 6th Intern. Conf. on Cond. and Breakdown in Solid Dielect. 1998. P. 309–312.