

УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТВЕРДОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ ПРОВОДЯЩИМИ КАНАЛАМИ

Щерба М.А., ст. преподаватель

НТУУ «КПИ», кафедра теоретической электротехники

Сагара А.В., студент

НТУУ «КПИ», кафедра возобновляемых источников энергии

Введение. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к задачам расчета сильных электрических полей (ЭП) в неоднородных средах. Одной из причин является необходимость повысить диэлектрическую прочность и долговечность современных полимерных изоляционных материалов на высокие и сверхвысокие напряжения, в частности сшитого полиэтилена (СПЭ) [2]. Как отмечается во множестве работ, одной из основных причин деградации твердого диэлектрика в сильном ЭП считается появление проводящих (в частности водных) микровключений с последующим образованием и развитием водных триингов [5, 7]. Для описания электрофизических процессов разрушения структуры твердого диэлектрика важно провести расчет и анализ распределения ЭП в его объеме и выявить уровни и области наибольшего усиления поля.

В большинстве работ посвященных моделированию водных триингов в СПЭ изоляции их конфигурация существенно упрощалась. Так в одних работах области изоляции с триингами представлялись сплошными проводящими фигурами простых форм (большой частью эллипсоидами) [4], в то время как в других – отдельные ветви триингов имели цилиндрическую форму со сферическим округлением или без него на острие [2].

Исходя из экспериментальных данных в работе [6] предложено рассматривать структуру ветвей водных триингов состоящей из вытянутых эллипсоидов с тонкими проводящими каналами между ними (см. рис. 1). Такая модель обосновывается исходя из знаний о процессе триингообразования в СПЭ изоляции. При конденсации влаги в ее микропорах и микротрещинах образуются близкорасположенные микро- и субмикронные включения.

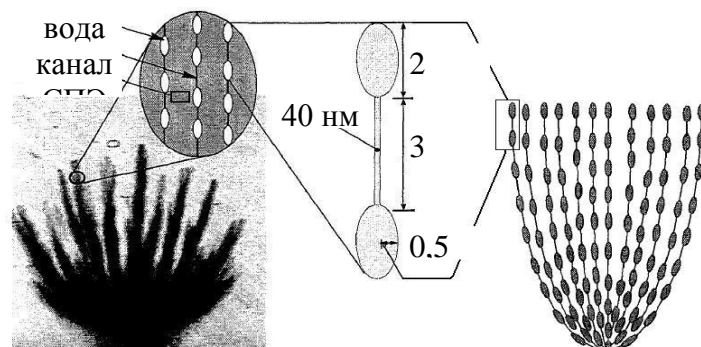


Рисунок 1 – Водный триинг в СПЭ изоляции в виде множества близко расположенных микровключений объединенных тонкими проводящими каналами [6]

Под действием пульсирующих электромеханических сил полюса включений создают давление на материал диэлектрика и при превышении его предела прочности образуют новые трещины, в которые постепенно проникает влага. Таким образом, между микровключениями образуются тонкие каналы, проводимость которых возрастает по мере их заполнения водой.

При указанной конфигурации водных триингов распределение ЭП в диэлектрике может существенно отличаться от результатов, приведенных в работах [2, 4, 5, 7]. Поэтому **целью данной работы** является математическое моделирование и анализ локальных усилений электрического поля в диэлектрике возле близко расположенных водных микровключений с объединяющими их каналами различной проводимости.

Постановка задачи. В данной работе рассматривался слой СПЭ изоляции толщиной 1 мм вблизи токопроводящей жилы кабеля 330 кВ. К слою приложено синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и амплитудой 10 кВ. В слое есть гетерогенные водные включения, имеющие форму эллипсоидов вращения с полуосями 0,5 и 1 мкм, соединенные цилиндрическими каналами радиусом 40 нм и длиной 3 мкм, что является характерной структурой для водных триингов [6]. Удельная проводимость каналов $\sigma_{\text{канала}}$ изменялась от 10^{-14} См/м (проводимость полиэтилена) до 10^{-2} См/м (проводимость воды). Диэлектрическая среда считалась однородной, линейной и изотропной. Задача решалась в квазистатическом допущении: $\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$. Вводился скалярный электрический потенциал ϕ согласно уравнению $\mathbf{E} = -\text{grad } \phi$.

Из уравнений Максвелла с применением метода комплексных амплитуд расчетное уравнение для распределения потенциал ϕ имеет вид [1–3]:

$$\text{div}[(\gamma - i\omega\epsilon\epsilon_0) \cdot \text{grad } \phi] = 0 . \quad (1)$$

Для получения единственного решения, уравнение (1) на верхней и нижней границах расчетной области дополнялось условиями Дирихле (заданием значений потенциалов), а на боковых границах – условиями Неймана (равенством нулю производных потенциалов по нормали к поверхности). На границе раздела СПЭ изоляция – водное микровключение задавались условия равенства потенциалов и их производных по нормали к поверхности [1–3]:

$$\phi_1(t) = \phi_2(t) , \quad (2) \quad (\gamma_1 + i\omega\epsilon_0\epsilon_1) \partial\phi_1(t)/\partial n = (\gamma_2 + i\omega\epsilon_0\epsilon_2) \partial\phi_2(t)/\partial n . \quad (3)$$

Уравнение (1) решалось методом конечных элементов.

Результаты исследований. Распределение напряженности ЭП E в СПЭ изоляции при изменении проводимости каналов между микровключениями $\sigma_{\text{канала}}$ от 10^{-14} до 10^{-2} См/м показано на рис. 2 (согласно шкале справа). Тонированная область в целом является областью напряженного объема V_H (областью, в которой E усилилось на 50 % и более по сравнению со средним значением $E_{\text{ср}} = 10$ кВ/мм в изоляции).

Таблица 1 – Величины E_{max} и V_H в диэлектрике с микровключениями

$\sigma_{\text{канала}}$, См/м	10^{-14} (СПЭ)	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2} (вода)
E_{max} , кВ/мм	57	58	216	250
V_H , мкм ³	5,8	6,1	113,9	322,2

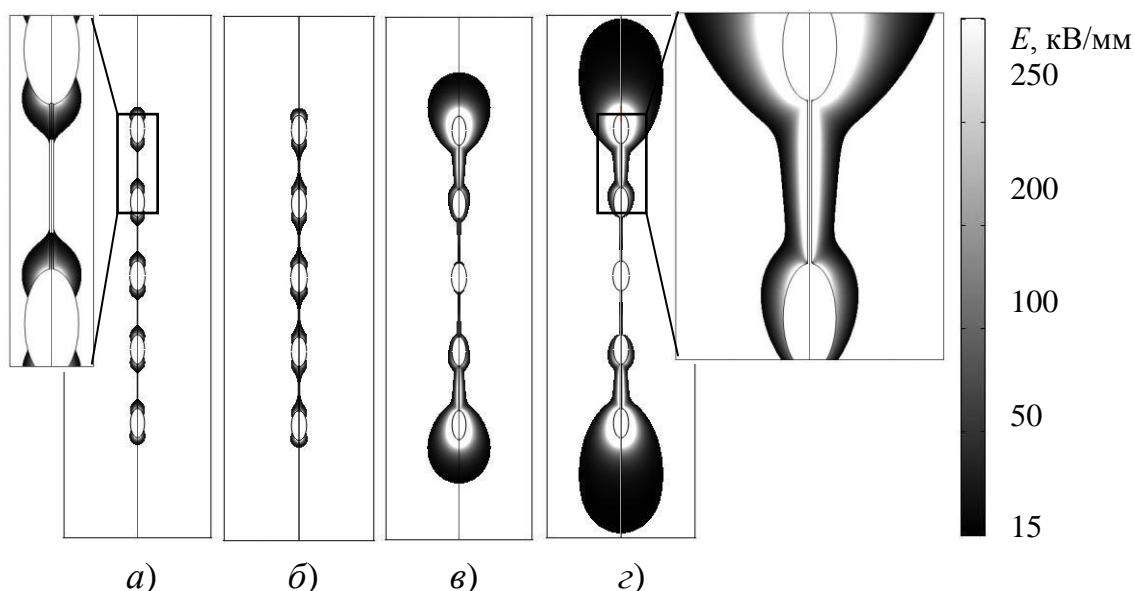


Рисунок 2 – Распределение напряженности ЭП в СПЭ изоляции вблизи проводящих микровключений соединенных тонкими каналами

Значения максимальной напряженности поля E_{\max} и величины V_H приведены в табл. 1. Согласно результатам проведенного численного эксперимента можно сделать следующие **выводы**:

При образовании между эллипсоидальными микровключениями проводящего канала и при увеличении его проводимости электрическое поле существенно возмущается, что проявляется в росте величин его напряженности E и напряженного объема изоляции V_H . При достижении проводимости канала значений характерных для воды $\sigma_v = 0,01$ См/м максимальная напряженность ЭП E_{\max} растет в 4,4 раза (до 250 кВ/мм), а напряженный объем V_H – в 55,5 раз (до 322 мкм³) по сравнению с отдельными микрокаплями воды.

Таким образом, уточнение конфигурации водных триингов позволяет выявить существенное усиление электрического поля в диэлектрике и точнее описать электрофизические процессы в сшитой полиэтиленовой изоляции при их появлении.

Перечень ссылок

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
2. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.
3. Щерба М.А. Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш Формат, 2013. – 223 с.
4. Burkes K. Makram E., Hadidi R. Modeling the Effect of a Water Tree inside Tape Shield and Concentric Neutral Cables. In: Proc. COMSOL Conf. Boston, 2014. p.1–9.
5. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on 9.4 (2002): 483–497.
6. Hvidsten S., Ildstad E., & Faremo H. Mechanisms causing nonlinear dielectric response of water treed XLPE cables. Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Proc. of the 1998 IEEE 6th International Conference on (pp. 73–78).
7. Ross R. Inception and propagation mechanisms of water treeing. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on 5.5 (1998): 660–680.