

УДК 621.3.01:537.212

## ВОЗМУЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗНОРАЗМЕРНЫМИ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ВОДНЫМИ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ В ТВЕРДОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

**М.А. Щерба**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина  
m.shcherba@gmail.com

*Выполнены математическое моделирование и анализ распределения электрических поля, токов, сил и давлений в твердом диэлектрике (сшитой полиэтиленовой изоляции) при возникновении разноразмерных близко расположенных токопроводящих, в частности водных микровключений. Исследованы закономерности усиления поля, увеличения плотности токов и возникающих электромеханических сил и давлений, вызванных изменением поверхностных зарядов, на близко расположенных полюсах микровключений. Определены зависимости указанных величин от конфигурации микровключений, в частности, от их взаимных расстояний. Показано, что результирующие силы способствуют притягиванию мелких водных включений к крупным и создают условия для появления и развития водных триингов в твердой изоляции. Библ. 8, рис. 4.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, водные микровключения, диэлектрик, сшитый полиэтилен, математическое моделирование, силы, давления, токи.

В настоящее время в электроэнергетическом оборудовании на разные классы напряжений, в частности в кабелях энергетического назначения, преимущественно применяется сшитая полиэтиленовая (СПЭ) изоляция, являющаяся характерным примером твердого диэлектрика [3, 5, 7]. Несмотря на ее широкое применение, актуальной остается задача повышения ее ресурса и уровня рабочего напряжения. Одной из основных причин деградации СПЭ изоляции считается появление в ней проводящих (как правило, водных) микровключений и последующее образование на их поверхности водных триингов (тонких разветвленных структур) [3, 5, 8]. Известны работы, направленные на исследование усиления электрического поля (ЭП) в локальных микрообъемах СПЭ изоляции возле водных микродефектов (включений и триингов) и анализ зависимости таких усиления от размеров, формы и взаимного расположения этих микродефектов [3, 4, 8]. Показано, что ЭП в таких микрообластях может усиливаться в десятки раз, превышать электрическую прочность материала и способствовать его локальным пробоям [3, 7]. При этом важно учитывать, что наиболее интенсивная деградация СПЭ изоляции происходит при совместном воздействии электрических, термических и механических процессов, возникающих в ней при действии сильных ЭП [2–4]. В переменном поле в диэлектрике возле полюсов каждого водного микровключения и ветвей триингов возникают пульсирующие давления, которые с удвоенной частотой действуют на материал диэлектрика [3, 4, 7]. В изоляционном промежутке между близко расположенными полюсами включений и сужениях ветвей триингов возникают повышенные токи проводимости, которые, замыкаясь через токи смещения в близлежащих областях диэлектрика, вызывают неоднородный перегрев локальных микрообъемов СПЭ изоляции [3, 4, 8].

Конфигурация проводящих микровключений и триингов в диэлектрике может меняться в процессе эксплуатации кабелей. В работах [2, 3] показано, что в СПЭ изоляции высоковольтных кабелей в результате диэлектрофореза молекулы воды втягиваются в микрообласти повышенной напряженности ЭП возле полюсов проводящих микровключений, образуя "облако" близко расположенных капель воды. Между ними со временем начинают появляться тонкие каналы, которые, заполняясь водой, могут объединять включения в единую разветвленную проводящую структуру – водный триинг [7]. Причем такая структура дополнительно усиливает ЭП, интенсифицируя процессы диэлектрофореза и способствуя своему прорастанию в новые области СПЭ изоляции.

В публикации [8] обосновано, что проводимость полиэтилена можно представить как перемещение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах. В такой модели при возникновении внешнего ЭП высота потенциального барьера в направлении его силовых линий уменьшается, и увеличивается вероятность прыжка носителя заряда. Таким образом, нелинейное увеличение тока проводимости  $J_{пр}$  при линейном росте напряженности ЭП  $E$ , наблюдаемое в экспериментальной работе [7], можно описать увеличением удельной проводимости  $\sigma(E)$  согласно закону Ома:  $J_{пр} = \sigma(E) \cdot E$ . Величина напряженности  $E$ , необходимая для проявления таких нелинейных свойств, должна составлять от 20 кВ/мм и выше. Подобные значения  $E$  могут возникать между близко расположенными водными микровключениями и у острий водных триингов [3, 4].

Поскольку СПЭ изоляция является твердым диэлектриком, то влага распространяется в ней в зависимости от конфигурации микропор и микротрещин. Этот процесс может длиться сотни часов и дней. То есть водные включения микронных и субмикронных размеров, попадая в поле микровключений обычных размеров (до 50 мкм), длительное время будут находиться в виде разрозненного облака. В работах [3, 4] показано, что накопление влаги в СПЭ изоляции в виде множества близко расположенных капель малого размера – "облака" может быть опаснее, чем концентрация всей жидкости в одном микровключении, поскольку с ростом количества дефектов увеличиваются максимальная напряженность ЭП и количество локальных областей повышенных плотностей токов и давлений. Поэтому важно исследовать не только возмущения ЭП после объединения капель в триинги, как, например, в работах [7, 8], но и неоднородное распределение поля вблизи полюсов разноразмерных близко расположенных микровключений. Актуальными являются также выявление наиболее опасных конфигураций водных микровключений и разработка рекомендаций по их минимизации для увеличения ресурса и уровней рабочих напряжений СПЭ изоляции. Решению указанных научных задач и посвящена данная работа.

Целью работы являются математическое моделирование и анализ распределения электрических поля, токов, сил и давлений в сшитой полиэтиленовой изоляции при возникновении в ней близко расположенных разноразмерных водных микровключений.

**Физико-математическая постановка задачи.** Рассчитывалось распределение ЭП в твердом диэлектрике (сшитой полиэтиленовой изоляции) сверхвысоковольтного кабеля на напряжение до 330 кВ. Напряженность ЭП в СПЭ изоляции вблизи токопроводящей жилы кабеля 330 кВ составляет 10–13 кВ/мм [3]. Моделирование поля проводилось в микрообласти диэлектрика цилиндрической формы высотой 200 мкм и диаметром 150 мкм, к которой приложено синусоидальное напряжение 2 кВ частотой 50 Гц (см. рис. 1), т.е. средняя напряженность поля равнялась  $E_{ср} = 10$  кВ/мм. Моделировалось наличие в диэлектрике водного

микровключения сферической формы диаметром 50 мкм и пяти водных эллипсоидальных микровключений с полуосями 5; 2,5 и 2,5 мкм. Такая конфигурация является наиболее характерной согласно результатам экспериментальных работ [3, 5].

Среды считались однородными, изотропными и линейными при  $E_{ср} < 20$  кВ/мм. При  $E_{ср} \geq 20$  кВ/мм учитывалась зависимость удельной электропроводности СПЭ изоляции  $\sigma(E)$  от напряженности ЭП  $E$ . Согласно модели, разработанной в [7], зависимость  $\sigma(E)$  представлялась следующим выражением:

$$\sigma(E) = \sigma_{const} \left( \frac{2kT}{aeE(t)} \right) \text{sh} \left( \frac{aeE(t)}{2kT} \right), \tag{1}$$

где  $\sigma_{const} = 10^{-14}$  См/м – постоянная проводимость СПЭ в слабом ЭП;  $e$  – заряд носителя;  $T$  – абсолютная температура;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больц-

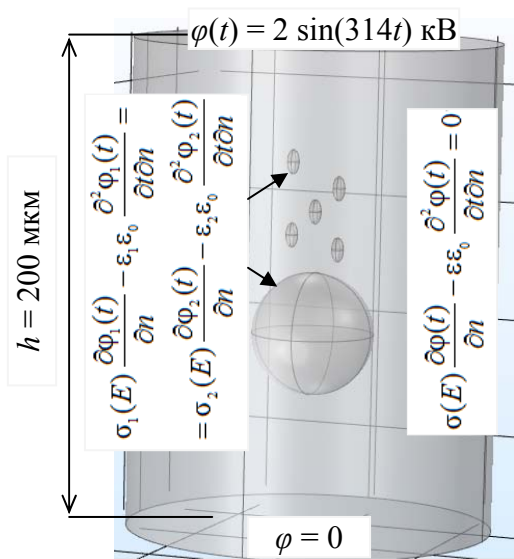


Рис. 1

мана;  $a$  – расстояние между потенциальными энергетическими барьерами, которое для полиэтилена порядка 2 нм.

В уравнении (1) мгновенное значение удельной проводимости  $\sigma(E)$  в каждой точке СПЭ изоляции считалось скалярной величиной, как и в работе [4]. Учитывая, что частота поля 50 Гц, то задача формулировалась в квазистатическом приближении согласно системе уравнений Максвелла [1]. Расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала  $\varphi(t)$ , как и в [2–4], записывалось в виде

$$\operatorname{div} \left[ \sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma(E)$ ,  $\varepsilon$  – электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость сред.

Уравнение (2) на верхней и нижней границах расчетной области, представленной на рис. 1, дополнялось условиями Дирихле (заданием значений потенциалов  $\varphi(t)$ , найденных из решения задачи на макроуровне, т.е. распределения ЭП по поперечному сечению кабеля). На боковых границах расчетной области оно дополнялось условиями Неймана (равенством нулю производных потенциалов  $\varphi(t)$  по нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности, что соответствует отсутствию токов в этих направлениях). На границе раздела вода–СПЭ изоляция задавались условия равенства производных потенциалов по нормали к поверхности:

$$\sigma_1(E) \frac{\partial \varphi_1(t)}{\partial n} - \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_1(t)}{\partial t \partial n} = \sigma_2(E) \frac{\partial \varphi_2(t)}{\partial n} - \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_2(t)}{\partial t \partial n}, \quad (3)$$

т.е. равенства нормальных компонент плотности полного тока  $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_{\text{полн.1}}(t) - \mathbf{J}_{\text{полн.2}}(t)) = 0$ .

Расчетный интервал времени  $\Delta t$  дискретизировался, и уравнение (2) решалось методом конечных элементов для всех моментов времени  $t_i$  с учетом нелинейной зависимости, определяемой согласно выражению (6).

Вектор плотности полного тока  $\mathbf{J}_{\text{полн}}(t)$  рассчитывался как сумма векторов тока проводимости  $\mathbf{J}_{\text{пр}}(t)$  в водных микродефектах и тока смещения  $\mathbf{J}_{\text{см}}(t)$  в СПЭ изоляции:

$$\mathbf{J}_{\text{полн}}(t) = \mathbf{J}_{\text{пр}}(t) + \mathbf{J}_{\text{см}}(t) = \sigma(E) \mathbf{E}(t) + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(t)}{\partial t}. \quad (4)$$

В каждой точке  $i$  расчетного объема СПЭ изоляции определялись значения  $\varphi(t_i)$ ,  $\mathbf{E}(t_i)$ ,  $\mathbf{J}_{\text{пр}}(t_i)$ ,  $\mathbf{J}_{\text{см}}(t_i)$  и  $\mathbf{J}_{\text{полн}}(t_i)$ . Расчет начинался с нулевых начальных условий, т.е. при  $t = 0$ , при котором к изоляции прикладывалось напряжение  $U(t = 0) = \Delta \varphi(t = 0) = 0$  и величины  $\varphi(t = 0) = 0$ ,  $\mathbf{E}(t = 0) = 0$  и  $\mathbf{J}_{\text{полн}}(t = 0) = 0$ . С момента времени  $t = 0$  начинался переходный процесс до достижения установившегося режима при  $U(t) = U_m \sin(314t)$  кВ.

Для расчета электромеханических давлений  $\mathbf{f}(t)$  на границе раздела проводник–диэлектрик и сил  $\mathbf{F}(t)$ , действующих на микровключения под действием внешнего ЭП, использовался тензор напряжений Максвелла  $\mathbf{T}(t)$  [1]:

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{T}(t) = \mathbf{n} \cdot [\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{D}(t)] = \mathbf{n} \cdot [\varepsilon \varepsilon_0 (\operatorname{grad} \varphi(t)) \cdot (\operatorname{grad} \varphi(t))]; \quad (5)$$

$$\mathbf{F}(t) = \oint_s \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{D}(t) dS = \varepsilon \varepsilon_0 \oint_s (\operatorname{grad} \varphi(t)) \cdot (\operatorname{grad} \varphi(t)) dS. \quad (6)$$

Распределение скалярного потенциала  $\varphi(t)$  в расчетной области находилось с помощью метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics [6]. Анализировались действующие значения рассчитанных временных функций, т.е. величины  $\varphi$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{J}_{\text{пр}}$ ,  $\mathbf{J}_{\text{см}}$ ,  $\mathbf{J}_{\text{полн}}$ ,  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{F}$ .

**Результаты численного эксперимента.** Результаты численного эксперимента по расчету распределения ЭП в расчетной области СПЭ изоляции представлены на рис. 2. Величина  $E$  показана в относительных единицах в виде коэффициента усиления электрического поля  $k_E = E/E_{\text{ср}}$  [2–4], т.е. отнесенная к средней напряженности  $E_{\text{ср}} = 10$  кВ/мм в объеме СПЭ изоляции без водных микровключений. Величина напряженности соответствует шкале на рис. 2 а справа, т.е. чем светлее тонирование, тем большее  $E$  наблюдается в изоляции.

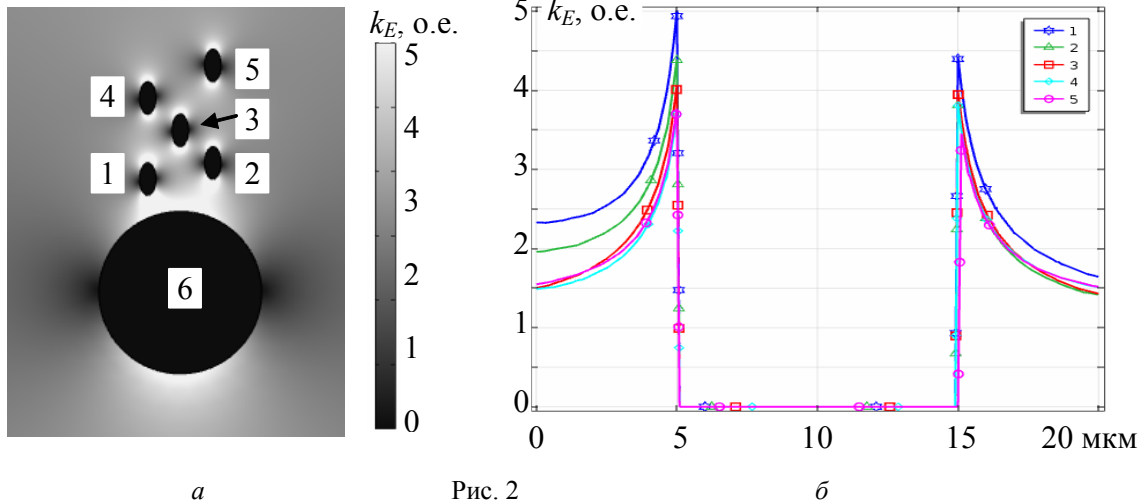


Рис. 2

Наибольшие значения  $k_E \geq 4$  наблюдаются у полюсов эллипсоидальных включений (№1, 2, 3, 4, 5), а максимальное значение  $k_{E \max} = 5$  наблюдается у полюса капли №1 как наиболее близкого к поверхности сферического микровключения. На графике рис. 2 б приведено распределение ЭП вблизи каждого из этих пяти водных микровключений (на расстоянии до 5  $\mu\text{m}$  от каждого из полюсов вдоль поля). Кривые 1...5 соответствуют значениям коэффициента усиления ЭП  $k_E$  для каждого из них. Значения  $E \approx 0$  для диапазона координат 5–15  $\mu\text{m}$  соответствуют включениям, в которых как в проводниках ЭП практически отсутствует. Пики на рис. 2 б слева показывают усиление поля возле полюсов включений, расположенных ближе к поверхности большого микровключения № 6 диаметром 50  $\mu\text{m}$ . Так, например, для эллипсоида № 1 разница в величине  $k_E$  на разных полюсах составляет 14 % ( $k_E = 5$  и  $k_E = 4,4$ ). В то же время усиление ЭП вблизи одиночного водного эллипсоида с таким же соотношением полуосей составляет  $k_E = 3,8$ . Дополнительный рост величин  $k_E$  на 30 % наглядно демонстрирует влияние близко расположенного микровключения № 6.

Результаты по расчету распределения электромеханических давлений  $f$  со стороны воды в дефектах на поверхность СПЭ изоляции представлены на рис. 3. Стрелками на рис. 3 а показаны величина и направление давлений  $f$ .

Отметим, что максимальные давления у полюсов водных включений № 1...5 более чем в пять раз больше, чем максимальное давление у полюсов микровключения № 6 (26 и 5 кПа соответственно). На рис 3 б наблюдаются два пика давлений на полюсах микровключений 1–5 вдоль ЭП, причем левый пик больший, поскольку отражает давления у полюса, расположенного ближе к поверхности микровключения № 6. Наличие включения № 6 увеличивает локальные давления почти в два раза (до 26 кПа) по сравнению с одиночным эллипсоидом такой же конфигурации, для которого  $f = 14$  кПа. Результирующая электрическая сила  $F$ , действующая на каждый из водных микродефектов, рассчитывается как интеграл от

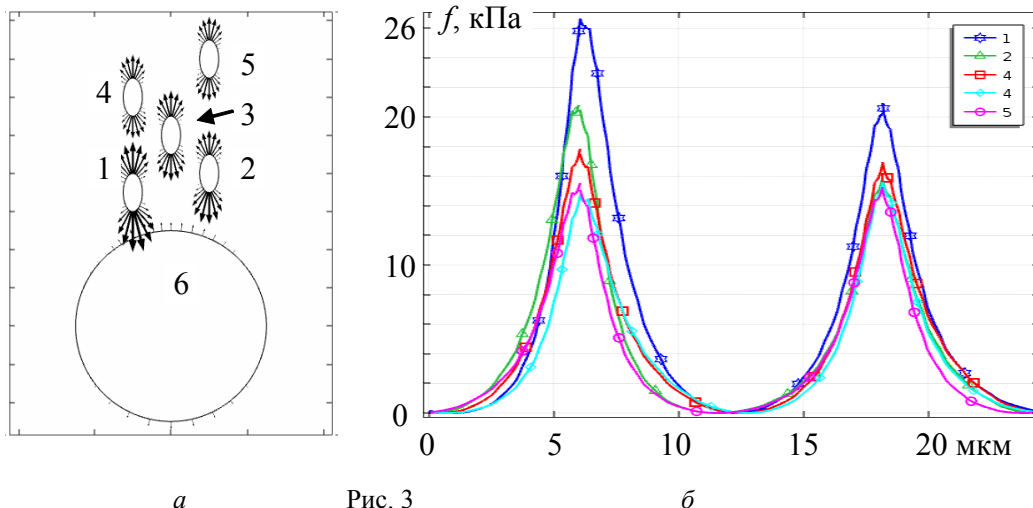


Рис. 3

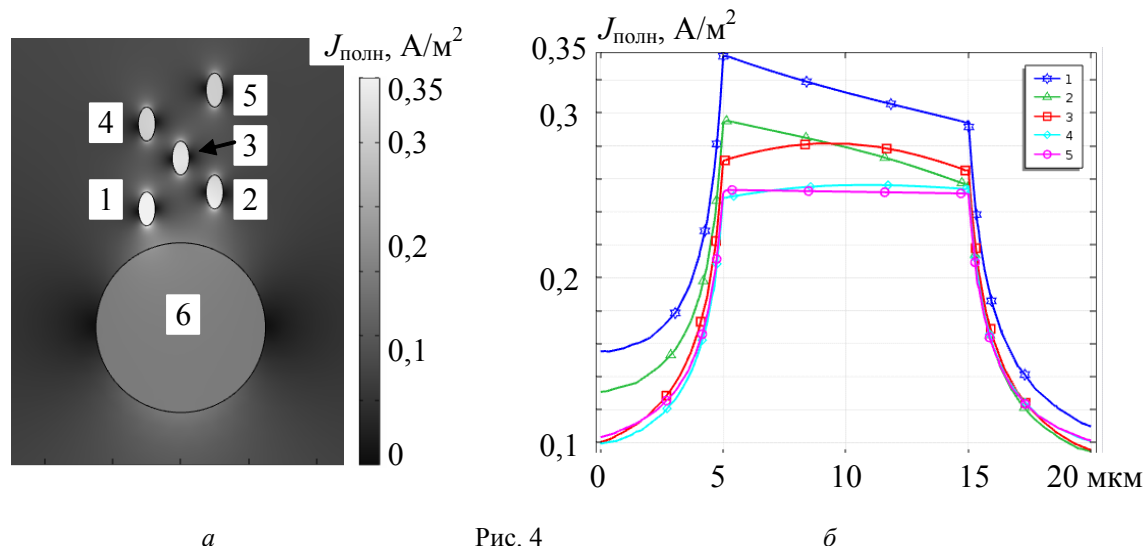


Рис. 4

возникающих давлений  $f$  по их поверхности. И если для микровключения №6  $F = 0$ , то для эллипсоидов результирующая сила диэлектрофореза  $F$  отлична от нуля. Она направлена на притяжения эллипсоидов к поверхности сферического микровключения.

На рис. 4 показано распределение плотности полного тока  $J_{\text{полн}}$  в расчетной области СПЭ изоляции с описанными водными микровключениями. Величина  $J_{\text{полн}}$  соответствует шкале на рис. 4 а справа, т.е. чем светлее тонирование, тем большее  $J_{\text{полн}}$ .

На графике рис. 4 б показано распределение  $J_{\text{полн}}$  вблизи каждого из пяти эллипсоидальных микровключений (на расстоянии до 5 мкм от каждого из полюсов вдоль поля). Кривые 1–5 соответствуют каждой из пяти капель воды. Наибольшие плотности тока (от 0,25 до 0,35 А/м<sup>2</sup>) наблюдаются внутри капель воды, что отражено горизонтальными или наклонными «полками» максимальных значений на графиках. Отметим, что внутри одиночной (удаленной от других) капли в диэлектрике распределение  $J_{\text{полн}}$  однородное, что отражено горизонтальной «полкой» на кривой 5 рис. 4 б. В то же время близко расположенное большое микровключение № 6 влияет на распределение  $J_{\text{полн}}$ , делая его неоднородным и смещая точку максимальной плотности  $J_{\text{полн max}}$  ближе к своей поверхности. Так, на кривой 3 максимум наблюдается примерно посередине кривой, т.е. в центре включения, а на кривых 4 и 5 – максимум возле начала «полочки», т.е. возле полюсов, ближних к микровключению № 6. Причем чем ближе эллипсоиды к поверхности сферического включения, тем сильнее растет в них  $J_{\text{полн max}}$ . По сравнению с одиночным эллипсоидом в СПЭ изоляции  $J_{\text{полн max}}$  возрастает на 40 % (от 0,25 до 0,35 А/м<sup>2</sup>). Рост токов проводимости  $J_{\text{пр}}$  в микровключениях приводит к увеличению плотности токов в СПЭ изоляции возле них и вызывает ее разогрев из-за выделения Джоулева тепла. Рост температуры СПЭ изоляции уменьшает ее электрическую и механическую прочности и способствует процессам ее деградации.

Расчет величин  $E$ ,  $f$ ,  $F$  и  $J_{\text{полн}}$  при учете нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях показал, что близко расположенное сферическое микровключение диаметром 50 мкм существенно усиливает напряженность ЭП, локальные давления и плотности токов в СПЭ изоляции вблизи микровключений меньших размеров. Следует также учитывать, что за счет диэлектрофореза малые включения будут притягиваться к поверхности больших, способствуя возникновению водных триингов, которые в свою очередь еще больше усиливают ЭП в объеме СПЭ изоляции, интенсифицируя процессы ее деградации.

**Выводы.** Выполнено математическое моделирование и проведен анализ распределения электрических поля, токов, сил и давлений возле капель воды в сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей при наличии близко расположенных разноразмерных водных микровключений и учете нелинейных свойств диэлектрика в сильных электрических полях.

Анализ показал, что разноразмерные близко расположенные микровключения могут вызывать существенное (в 1,3 раза и более) усиление напряженности ЭП, увеличивая почти в

два раза локальне тисків водних мікрровключень на ізоляцію і підвищують щільності струмів в локальних областях діелектрика на 40 % і більше. Більше мікрровключень робить неоднорідним розподіл щільності повного струму в менших мікрровключеннях і зміщує точку максимальної щільності струму ближче до своєї поверхні. Поруч з більшими мікрровключеннями створюються області підвищеної напруженості поля, в які з часом втягуються мікрровключення меншого розміру. В сукупності з пульсуючими тисками на матеріал діелектрика, які максимальні поруч з мікрровключеннями, створюються умови для виникнення і проростання водних триєктів, об'єднують мікрровключення в єдину провідну структуру. Така структура ще більше посилює зовнішнє електричне поле і викликає додаткову деградацію твердої СПЭ ізоляції.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Електродинаміка сплошних серед. 4-е изд. – М.: Физматлит. – 2003. – 560 с.
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. – 304 с.
3. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2013. – 550 с.
4. Щерба М.А. Особенности локального усиления электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
5. Burkes K.W., Makram E.B., Hadidi R. Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. – 2015. – Vol. 2(2). – P. 53-62.
6. Comsol Inc. Burlington, MA. <https://www.comsol.com>, 2017.
7. Wang W., Tao W., Ma Z., Liu J. The mechanism of water tree growth in XLPE cables based on the finite element method // High Voltage Engineering and Application. – 2016. – P. 1-4.
8. Zhou K., Li K., Yang M., Huang M. Insight into the influence of mechanical orientation on water tree propagation according to abnormal water tree // IEEE Intern. Conf. In Dielectrics. – 2016. – Vol. 2. – P. 836–839.

УДК 621.3.01:537.212

**М.А. Щерба**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

**Збурення електричного поля різнорозмірними близько розташованими водними мікрровключеннями в твердому діелектрику**

*Виконано математичне моделювання та аналіз розподілу електричних поля, струмів, сил і тисків у твердому діелектрику (зшитій поліетиленовій ізоляції) при утворенні різнорозмірних близько розташованих струмопровідних, зокрема, водних мікрровключень. Досліджено закономірності підсилення поля, збільшення густини струмів і виникаючих електромеханічних сил і тисків, обумовлених зміною поверхневих зарядів, на близько розташованих полюсах мікрровключень. Визначено залежності зазначених величин від конфігурації мікрровключень, зокрема, від їх взаємних відстаней. Показано, що результуючі сили сприяють притягуванню дрібних водних включень до великих, створюючи умови для появи і розвитку водних триєктів у твердій ізоляції. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** електричне поле, водні мікрровключення, діелектрик, зшитий поліетилен, математичне моделювання, сили, тиски, струми.

**M.A. Shcherba**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

**The electric field disturbances by different-size closely located water micro-inclusions in the solid dielectric**

*The mathematical modeling and the analysis of distribution of electric field, currents, forces and pressures in a solid dielectric (cross-linked polyethylene insulation) are performed for appearing of different-size closely located current-conducting (in particular water) micro-inclusions. The regularities of the field amplification, increasing of the current density and the resulting electromechanical forces and pressures, caused by changes in surface charges at closely located poles of micro-inclusions, have been studied. The dependences of these values on the configuration of micro-inclusions, in particular on their mutual distances, are determined. It is shown that the resultant forces contribute to attracting of small water inclusions to large ones and create conditions for the appearance and development of water trees in solid insulation. References 8, figures 4.*

**Key words:** electric field, water micro-inclusions, dielectric, cross-linked polyethylene, mathematical modeling, forces, pressures, currents.

Надійшла 01.09.2017

Received 01.09.2017